



**TIAGO JORGE  
SANTIAGO  
RODRIGUES**

**REFORÇO DE ESTRUTURAS COM FRP's**



**TIAGO JORGE  
SANTIAGO  
RODRIGUES**

## **REFORÇO DE ESTRUTURAS COM FRP's**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Moraes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus queridos Pais, Adelino Rodrigues e M<sup>a</sup> Fernanda Santiago pelo seu grande esforço e encorajamento, à minha Irmã e Afilhado Gaspar.

Dedico também à minha Mónica por todo o apoio e compreensão.  
A vocês devo uma parte daquilo que sou hoje. Obrigado!

## **o júri**

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís Filipe Pereira Juvandes  
professor da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Humberto Salazar Amorim Varum  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

A todos os que me acompanharam durante esta fase da minha vida através da sua disponibilidade, compreensão e amizade e que de forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho, desejo expressar aqui o meu profundo reconhecimento e agradecimento.

Ao orientador Professor Miguel Morais e co-orientador Professor Humberto Varum, quero expressar o meu agradecimento pelos seus ensinamentos, dedicação, partilha de conhecimentos técnico-científicos e, principalmente, amizade que me permitiu a elaboração deste trabalho e a minha formação como engenheiro.

Ao Engenheiro Hugo Rodrigues do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, por todo o apoio, atenção e disponibilidade.

Ao Professor Daniel Oliveira da Universidade do Minho, pela colaboração.

Ao Departamento de Engenharia Civil e a todos os seus docentes.

Aos meus Pais Adelino Rodrigues e M<sup>a</sup> Fernanda Santiago, agradeço de uma forma muito especial, o amor e o carinho que incondicionalmente me dedicam, a compreensão que sempre demonstraram e o permanente incentivo nos momentos mais difíceis, bem como todo o esforço feito para que este trabalho hoje exista.

Ao meu Afilhado Gaspar, pela companhia e “consumição” ao longo dos dias de trabalho que tanta ajuda moral davam.

À minha Irmã e Cunhado, pela coragem e incentivo.

Ao saudoso Avô Gaspar, que certamente ficaria muito feliz por ver este trabalho concluído.

Finalmente, agradeço à minha Mónica o incentivo, a compreensão, a dedicação e o amor, que tanto têm contribuído para a minha felicidade, e consequentemente para a concretização desta dissertação.

A todos os mencionados e aqueles que não mencionei a minha mais profunda gratidão.

## palavras-chave

ACI, CNR, confinamento, corte, documento, estrutura, *fib*, flexão, laje, laminado, manta, momento flector, pilar, reforço, resina, sistema FRP, tecido, viga.

## resumo

Nos dias de hoje, os engenheiros estão cada vez mais à procura de novos materiais que permitam prolongar a vida das estruturas existentes permitindo, ao mesmo tempo, a concepção e construção de novas estruturas duradouras. Os polímeros reforçados com fibras (FRP's – *Fiber Reinforced Polymer*) são uma nova classe de materiais leves, de alta resistência, não corrosíveis e com inúmeras vantagens em relação aos materiais convencionais para aplicação na área estrutural. Assim, dada a grande importância destes novos materiais e a necessidade de criar códigos que permitam o controlo da sua aplicação, na presente dissertação estudaram-se os documentos propostos pela *fib*, pelo ACI e pelo CNR. Numa primeira fase fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre os produtos (materiais), técnicas e soluções de reforço estrutural e controlo de qualidade do reforço com FRP's, fazendo-se para cada um destes pontos uma confrontação das recomendações, normas e guidelines existentes a fim de saber qual o grau de abordagem de cada uma acerca dos mesmos.

Numa fase seguinte aplicou-se cada uma das metodologias de cálculo propostas pelos documentos analisados a uma viga teórica com necessidades de reforço à flexão e ao corte devido a um aumento de esforços provocado pelo aumento da sobrecarga em quatro vezes. Procedeu-se da mesma forma em relação a um pilar teórico inserido num edifício de habitação de 5 pisos, cuja necessidade de reforço surgiu devido a não ter sido calculado ao sismo.

Por fim, para uma viga teórica fez-se uma análise paramétrica variando o momento reduzido da secção, o número de camadas de reforço e a sua disposição de aplicação no elemento a fim de perceber qual a sensibilidade e as modificações resultantes para cada um dos documentos aplicados. Desta análise pode-se concluir que o reforço é mais eficaz quando aplicado a par, sendo as soluções obtidas pelo documento da *fib* as mais viáveis.

## keywords

ACI, adhesive, beam, bending moment, CNR, column, confinement, document, fabric, *fib*, flexural, FRP system, laminate, slab, shear, sheet, strengthening, structure.

## abstract

Nowadays engineers are increasingly looking for new materials that permit extend the life of existing structures while at the same time, permit the conception and construction of new durable structures. The fiber reinforced polymers (*FRP*'s) are a new class of lightweight, high strength, non corrosive and with numerous advantages over conventional materials for application in the structural area. Thus, given the importance of these new materials and the need to create codes that allow the monitoring of its implementation, in this dissertation we studied the documents proposed by the *fib*, the ACI and the CNR. In a first step, we was done a bibliographic research about the products (materials), structural reinforcement techniques and solutions and quality control of *FRP*'s reinforcements, making up for each of these points a comparison of existents recommendations, standards and guidelines in order to know the degree of approach of each one about them.

In a next step, we was applied to each of design methods proposed by the analyzed documents to a theoretical beam who need flexural reinforcement and shear reinforcement due to an increase of forces caused by the increased overhead four times. We was proceeded similarly in relation to a theoretical pillar inserted in a residential 5 floor, whose reinforcement necessity was given because it was not calculated to the earthquake.

Finally, for an theoretical beam we was don an parametric analysis varying the reduced moment of the section, the number of reinforcement layers and their application disposal in the element to find out the sensibility and the resulting changes for each one of applied documents. From this analysis we can conclude that the strengthening is most effective when applied together and the solutions obtained by the *fib* document are the most viable.

*“Quando todos pensam o mesmo  
é sinal que ninguém pensa muito.”*

*Walter Lippmann*



# Índice

<b>Índice de figuras .....</b>	<b>XV</b>
<b>Índice de tabelas .....</b>	<b>XIX</b>
<b>Lista de acrónimos.....</b>	<b>XXI</b>
<b>Lista de símbolos.....</b>	<b>XXIII</b>
<b>Capítulo 1. Introdução, Motivação, Objectivos e Estratégia.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introdução.....	1
1.2. Motivação .....	3
1.3. Objectivos.....	3
1.4. Estratégia .....	3
<b>Capítulo 2. Materiais de reforço FRP .....</b>	<b>5</b>
2.1. Matriz polimérica .....	6
2.1.1. Adesivos .....	7
2.1.2. Primers (primário) .....	8
2.1.3. Puttie filler (massa de epoxi niveladora) .....	9
2.1.4. Resina de Saturação.....	9
2.1.5. Revestimento Protector .....	9
2.2. Fibras .....	10
2.2.1. Fibras de vidro.....	11
2.2.2. Fibras de aramida.....	11
2.2.3. Fibras de carbono .....	11
2.3. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação aos materiais....	12
<b>Capítulo 3. Sistemas e produtos FRP .....</b>	<b>15</b>
3.1. Sistemas FRP de colagem exterior .....	15
3.1.1.1. Sistemas curados in-situ .....	16

3.1.2. Sistemas pré-fabricados.....	17
3.2. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação aos sistemas FRP	19
<b>Capítulo 4. Técnicas de reforço.....</b>	<b>21</b>
4.1. Reforço de lajes .....	21
4.2. Reforço de vigas.....	22
4.3. Reforço de pilares.....	24
4.4. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação às técnicas de reforço com FRP .....	26
<b>Capítulo 5. Controlo de Qualidade.....</b>	<b>29</b>
5.1. Qualificação dos materiais .....	29
5.1.1. Agente de colagem .....	30
5.1.1.1. Propriedades físicas.....	30
5.1.1.2. Durabilidade e propriedades mecânicas do adesivo curado.....	31
5.1.2. Sistema FRP-EBR .....	32
5.1.2.1. Tipo e características geométricas do FRP-EBR .....	32
5.1.2.2. Propriedades físicas do FRP-EBR.....	32
5.1.2.3. Durabilidade e propriedades mecânicas do FRP.....	33
5.2. Qualificação do construtor/aplicador .....	33
5.3. Inspeção e controlo de qualidade <i>in-situ</i> .....	34
5.3.1. Inspeção pré-instalação .....	34
5.3.2. Inspeção durante a instalação .....	34
5.3.3. Inspeção após a instalação .....	35
5.3.3.1. Inspeção de vazios e delaminações .....	35
5.3.3.2. Espessura do FRP curado .....	36
5.3.3.3. Teste de aderência .....	37
5.3.3.4. Teste de carga.....	37

5.4. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação ao controlo de qualidade.....	37
<b>Capítulo 6. Análise e aplicação das normas .....</b>	<b>41</b>
6.1. Descrição geral das normas .....	41
6.2. Apresentação do modelo teórico da viga para reforço à flexão e ao corte .....	43
6.3. Reforço à flexão.....	45
6.3.1. Condição de reforço máximo .....	47
6.3.2. Documento da fib (fib, 2001) .....	47
6.3.2.1. Bases de cálculo.....	47
6.3.2.2. Estado inicial .....	49
6.3.2.3. Estados limites últimos (ULS).....	50
6.3.2.4. Estados limites de utilização (SLS) .....	57
6.3.3. Documento do ACI (ACI 440.2R-02, 2002) .....	61
6.3.3.1. Bases de cálculo.....	61
6.3.3.2. Estado inicial .....	63
6.3.3.3. Estados limites últimos (ULS).....	63
6.3.3.4. Estados limites de utilização (SLS) .....	67
6.3.4. Documento do CNR (CNR, 2004) .....	69
6.3.4.1. Bases de cálculo.....	69
6.3.4.2. Estado inicial .....	71
6.3.4.3. Estados limites últimos (ULS).....	71
6.3.4.4. Estados limites de utilização (SLS) .....	73
6.3.5. Apresentação de resultados .....	75
6.4. Reforço ao corte.....	81
6.4.1. Documento da fib (fib, 2001) .....	82

6.4.1.1. Bases de cálculo .....	82
6.4.1.2. Estados limites últimos.....	83
6.4.2. Documento do ACI (ACI 440.2R-02, 2002).....	84
6.4.2.1. Bases de cálculo .....	84
6.4.2.2. Estados limites últimos.....	85
6.4.3. Documento do CNR (CNR, 2004) .....	87
6.4.3.1. Bases de cálculo .....	87
6.4.3.2. Estados limites últimos.....	88
6.4.4. Apresentação de resultados .....	89
6.5. Apresentação do modelo teórico do pilar para reforço à flexão e confinamento.....	91
6.6. Reforço por confinamento.....	93
6.6.1. Documento da fib (fib, 2001).....	93
6.6.2. Documento do ACI (ACI 440.2R-02, 2002).....	96
6.6.3. Documento do CNR (CNR, 2004) .....	98
6.7. Reforço à flexão .....	102
6.8. Apresentação de resultados .....	103
<b>Capítulo 7. Análise paramétrica .....</b>	<b>109</b>
7.1. Disposições gerais .....	109
7.2. Reforço por colagem de laminados a par .....	111
7.2.1. Momento flector resistente para os documentos em análise .....	111
7.2.2. Momento flector resistente em função do momento reduzido da secção e do número de camadas de laminado .....	114
7.3. Reforço por colagem de laminados sobrepostos .....	116
<b>Capítulo 8. Considerações finais .....</b>	<b>119</b>
8.1. Conclusões .....	119
8.2. Desenvolvimentos futuros.....	125

<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>127</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>133</b>
A. Análise paramétrica .....	133
A.1. Dados relativos aos gráficos da Figura 7.2.....	133
A.2. Dados relativos aos gráficos da Figura 7.3.....	137
A.3. Dados relativos aos gráficos da Figura 7.4.....	141

## Índice de figuras

### Capítulo 2

Figura 2.1: Componentes básicos que formam um compósito FRP (adaptado de ISIS, 2006a). .....	5
Figura 2.2: Resina epoxi (adaptado de Megalooikonomou, 2007).....	8
Figura 2.3: Ordem de aplicação dos materiais poliméricos (adaptado de BASF, 2007).....	9
Figura 2.4: Comportamento à tracção de fibras e outros materiais (adaptado de ACI 440R-96, 2002). .....	10

### Capítulo 3

Figura 3.1: Possíveis orientações das fibras (adaptado de Marques, 2008). .....	15
Figura 3.2: Exemplos de sistemas FRP pré-fabricados (adaptado de Changzhou, 2008; Cruz e Barros, 2002; Fonseca, 2007; Sika, 2003, respectivamente). .....	17

### Capítulo 4

Figura 4.1: Reforço de lajes à flexão (a) - adaptado de BASF, (2007); b) - adaptado de Juvandes e Costa, (2002); c) - adaptado de Motavalli, (2008)). .....	22
Figura 4.2: a) - Comportamento de uma viga com reforço e sem reforço à flexão (adaptado de BASF, 2007); b) - Reforço de vigas à flexão e ao corte (adaptado de BASF, 2007); c) - Sistema NSM (adaptado de Szabó e Balázs, 2007). .....	23
Figura 4.3: a) - Comportamento de uma viga com reforço e sem reforço ao corte (adaptado de BASF, 2007); b) - Reforço ao corte (adaptado de Juvandes e Costa, 2002); c) - Reforço ao corte e à flexão (adaptado de Juvandes e Costa, 2002). .....	23
Figura 4.4: Diferentes formas de reforço ao corte com FRP's (adaptado de CNR, 2004). .	24

Figura 4.5: a) - Reforço de pilares à flexão e confinamento (adaptado de Juvandes e Costa, 2002); b) - Reforço de pilares ao corte (adaptado de Juvandes e Costa, 2002); c) - Comportamento de pilares confinados com secção rectangular, circular e não confinados (adaptado de ISIS, 2006c).....	25
--	----

## Capítulo 5

Figura 5.1: Inspeção acústica com martelo (adaptado de ISIS, 2006e).....	36
Figura 5.2: Ensaio <i>pull-off</i> (adaptado de ISIS, 2006e).....	37

## Capítulo 6

Figura 6.1: Desenho de pormenor das armaduras da viga. ....	45
Figura 6.2: Lei de comportamento tensão-extensão do material FRP. ....	48
Figura 6.3: Distribuição de tensões e deformações numa secção de betão armado (adaptado de <i>fib</i> , 2001).....	50
Figura 6.4: Ligação perfeita entre o compósito e o betão. ....	51
Figura 6.5: Perda de ligação entre o compósito e o betão.....	51
Figura 6.6: Secção sujeita a momento flector em estado limite último (adaptado de <i>fib</i> , 2001).....	52
Figura 6.7: Análise linear elástica da secção fendilhada (adaptado de <i>fib</i> , 2001).....	58
Figura 6.8: Modos de rotura. ....	63
Figura 6.9: Distribuição de tensões e extensões numa secção à flexão (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).....	66
Figura 6.10: Comprimento de ancoragem de camadas sobrepostas.....	67
Figura 6.11: Modos de rotura. ....	71
Figura 6.12: Nível de tensão v.s. direcção principal das fibras.....	82
Figura 6.13: Diagrama de esforço transversal.....	84
Figura 6.14: Esquema representativo das variáveis usadas no reforço ao corte (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).....	87
Figura 6.15: Esquema representativo das variáveis usadas no reforço ao corte (adaptado de CNR, 2004).....	89
Figura 6.16: a) - Planta do edifício e amarração das lajes; b) - Esquema do edifício.....	92

Figura 6.17: Pormenor das armaduras do pilar: a) - Zona das vigas; b) - Zona da fundação. ....	92
Figura 6.18: Pressão de confinamento exercida pelo FRP e características da secção (adaptado de <i>fib</i> , 2001). ....	95
Figura 6.19: Geometria e propriedades da secção confinada (adaptado de CNR, 2004)..	101
Figura 6.20: Referencial usado nos cálculos. ....	103

## Capítulo 7

Figura 7.1: Disposição dos laminados: a) Dois laminados sobrepostos; b) Dois laminados a par. ....	110
Figura 7.2: Rácio entre o momento flector resistente após o reforço e antes do reforço para os documentos em análise, tendo em conta a variação do momento reduzido e do número de camadas de reforço. ....	111
Figura 7.3: Rácio entre o momento flector resistente após o reforço e antes do reforço para os documentos em análise – representação por momento reduzido. ....	115
Figura 7.4: Rácio entre o momento flector resistente após o reforço e antes do reforço para os documentos em análise – representação por momento reduzido. Camadas sobrepostas v.s. Camadas a par. ....	117



## Índice de tabelas

### Capítulo 2

Tabela 2.1: Comparação das propriedades típicas dos adesivos epoxi, betão e aço macio (adaptado de <i>fib</i> , 2001). .....	8
Tabela 2.2: Tipos de fibras e suas propriedades (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002; Fonseca 2005). .....	12

### Capítulo 3

Tabela 3.1: Descrição dos produtos usados nos sistemas FRP curados <i>in-situ</i> (adaptado de Juvandes e Costa, 2002). .....	16
Tabela 3.2: Propriedades de algumas mantas /tecidos de FRP comerciais. ....	17
Tabela 3.3: Propriedades de algumas resinas para aplicação das mantas e tecidos acima referidos. ....	17
Tabela 3.4: Propriedades dos laminados CFRP comerciais. ....	18
Tabela 3.5: Principais características da resina epoxi de colagem – A.R.1. ....	18
Tabela 3.6: Principais características da resina epoxi de colagem – B.R.1.....	18
Tabela 3.7: Principais características da resina epoxi de colagem – C.R.1.....	19

### Capítulo 5

Tabela 5.1: <i>Checklist</i> básica para controlo e garantia de qualidade (adaptado de ISIS, 2006e). .....	29
--	----

### Capítulo 6

Tabela 6.1: Cargas actuantes na viga; Carga de dimensionamento.....	44
Tabela 6.2: Coeficiente de segurança dos materiais FRP, $\gamma_f$ (adaptado de <i>fib</i> , 2001).....	49

Tabela 6.3: Factor de redução ambiental, CE, para os diferentes tipos de FRP (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).....	63
Tabela 6.4: Factor correctivo $\eta_1$ para o FRP devido aos efeitos a longo prazo (adaptado de CNR, 2004).....	71
Tabela 6.5: Coeficientes de segurança parciais para os sistemas e produtos FRP (adaptado de CNR, 2004).....	73
Tabela 6.6: Momentos flectores actuantes em ULS na viga a reforçar.....	75
Tabela 6.7: Características principais do sistema laminado de CFRP. ....	75
Tabela 6.8: Estado inicial da viga. ....	76
Tabela 6.9: Soluções de reforço FRP obtida em ULS.....	76
Tabela 6.10: Comprimento de colagem do reforço FRP.....	77
Tabela 6.11: Resultados obtidos para a limitação das tensões em SLS. ....	78
Tabela 6.12: Resultados obtidos para o controlo da deformação em SLS. ....	80
Tabela 6.13: Resultados obtidos para o controlo da fendilhação em SLS ....	81
Tabela 6.14: Factor de redução de resistência associado ao reforço FRP (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).....	86
Tabela 6.15: Esforço transversal actuante em ULS na viga a reforçar. ....	89
Tabela 6.16: Características principais da manta de CFRP. ....	89
Tabela 6.17: Resistência da secção ao esforço transversal antes do reforço. ....	90
Tabela 6.18: Capacidade resistente da secção após o reforço.....	90
Tabela 6.19: Expoente $a$ (adaptado de CEN, 2004).....	102
Tabela 6.20: Esforços actuantes de cálculo.....	104
Tabela 6.21: Esforços resistentes de cálculo da secção. ....	104
Tabela 6.22: Resistência de cálculo do betão confinado à compressão. ....	104
Tabela 6.23: Esforços resistentes de cálculo da secção confinada.....	105
Tabela 6.24: Características principais do sistema laminado de CFRP. ....	105
Tabela 6.25: Esforços resistentes de cálculo da secção confinada e reforçada à flexão. ..	106

## Capítulo 7

Tabela 7.1: Momentos reduzidos e respectivas secções. ....	109
Tabela 7.2: Características principais do sistema laminado de CFRP. ....	110

## Lista de acrónimos

ACI	- American Concrete Institute
AFRP	- Aramid Fiber Reinforced Polymer/Polímero reforçado com fibras de aramida
CEB	- <i>Comité Européen du Béton</i>
CEN	- European Committee for Standardization
CFRP	- Carbon Fiber Reinforced Polymer/Polímero reforçado com fibras de carbono
CNR	- Italian National Research Council
EBR	- Externally Bonded Reinforcement/Reforço colado exteriormente
EC2	- Eurocódigo 2
EC8	- Eurocódigo 8
<i>fib</i>	- <i>fédération internationale du béton</i>
FRP	- Fiber Reinforced Polymer
GFRP	- Glass Fiber Reinforced Polymer/Polímero reforçado com fibras de vidro
IPQ	- Instituto Português da Qualidade
ISIS	- Intelligent Sensing for Innovate Structures
JSCE	- Japan Society of Civil Engineers
NSM	- Near Surface Mounted Reinforcement
PSE	- Princípio da sobreposição dos efeitos
RC	- Reinforced Concrete/Betão armado
RSA	- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
SLS	- Serviceability Limit State/Estados Limites de Serviço
ULS	- Ultimate Limit State/Estados Limites Últimos
UV	- Ultraviolet light/Radiação Ultra-violeta

## Lista de símbolos

### *Desenvolvimento da tese*

#### *Letras maiúsculas latinas*

$A_c$	- Área da secção de betão
$A_s$	- Área de aço das armaduras longitudinais
$M_{Edz/y}$	- Momento de cálculo em relação ao eixo considerado, incluindo um momento de segunda ordem
$M_{Rd}$	- Momento flector resistente da secção antes do reforço
$M'_{Rd}$	- Momento flector resistente da secção após o reforço
$M_{Rdz/y}$	- Momento resistente na direcção considerada
$M_{rd0}$	- Valor de cálculo do momento flector resistente do elemento não reforçado
$M_{Sd}$	- Momento flector actuante
$M_{sdf}$	- Valor de cálculo do momento flector actuante na secção crítica reforçada em ULS
$M_x$	- Momento flector na direcção x
$M_y$	- Momento flector na direcção y
$N$	- Esforço axial
$N_{Ed}$	- Valor de cálculo do esforço axial
$N_{Rd}$	- Esforço axial resistente da do elemento
$R$	- Grau de reforço
$T_g$	- Glass Transition Temperatura/Temperatura de transição vítrea
$W_k$	- Valor característico da largura das fendas

#### *Letras gregas*

$\alpha$	- Flecha
$\varepsilon$	- Extensão
$\mu$	- Momento reduzido da secção
$\sigma$	- Tensão
$\sigma_{cc}$	- Tensão de compressão no betão em serviço
$\sigma_{st}$	- Tensão de tracção no aço em serviço

## **Documento da fib**

### *Letras maiúsculas latinas*

$A_f$	- Área da secção transversal do reforço FRP
$A_g$	- Área da secção transversal de betão
$A_s$	- Área de aço da armadura longitudinal
$A_{s1}$	- Área de aço da armadura longitudinal inferior
$A_{s2}$	- Área de aço da armadura longitudinal superior
$E_{cm}$	- Módulo de elasticidade secante do betão
$E_f$	- Módulo de elasticidade de cálculo do FRP
$E_{fk}$	- Valor característico do módulo de elasticidade do FRP
$E_{fu}$	- Valor último do módulo de elasticidade do FRP
$E_j$	- Módulo de elasticidade do encamisamento FRP
$E_s$	- Módulo de elasticidade do aço
$E_{sec,u}$	- Módulo de elasticidade secante último do betão confinado
$I_{02}$	- Momento de inércia da secção homogeneizada fendilhada antes do reforço
$I_1$	- Momento de inércia da secção não fendilhada em SLS
$I_2$	- Momento de inércia da secção fendilhada em SLS
$K_{conf}$	- Rigidez do confinamento FRP
$L$	- Distância a partir do apoio onde se efectua a dispensa do FRP
$M_0$	- Momento flector para as cargas em serviço antes do reforço
$M_a$	- Momento flector actuante na secção de dispensa do reforço
$M_{cr}$	- Momento de fendilhação
$M_k$	- Momento flector actuante em SLS para a combinação de acções adequada
$M_{Rd}$	- Valor de cálculo do momento flector resistente
$M_{Sd}$	- Valor de cálculo do momento flector actuante
$N_{fa}$	- Valor de cálculo da força de tracção máxima suportada pelo FRP
$N_{fa,max}$	- Força máxima de tracção suportada pelo FRP para o comprimento de ancoragem máximo
$N'_{fa,max}$	- Força máxima de tracção suportada pelo FRP para um comprimento de ancoragem inferior ao máximo
$N_{rk}$	- Esforço axial na secção devido ao binário de forças
$P_{sd}$	- Carregamento inicial no elemento

---

$P_{sd}'$	- Carregamento no elemento com o respectivo acréscimo de carga
$V$	- Esforço transversal actuante antes do acréscimo de esforços
$V'$	- Esforço transversal actuante após o acréscimo de esforços
$V_{cd}$	- Contribuição do betão para o esforço transversal resistente
$V_{fd}$	- Contribuição do reforço FRP para o esforço transversal resistente
$V_{Rd}$	- Esforço transversal resistente
$V_{Rd1}$	- Esforço transversal resistente da secção segundo EC2 de 1998
$V_{Rd2}$	- Esforço transversal resistente máximo
$V_{Sd}$	- Esforço transversal actuante
$V_{wd}$	- Contribuição da armadura para o esforço transversal resistente
$W_k$	- Valor característico da largura das fendas

*Letras minúsculas latinas*

$a$	- Flecha total em serviço
$a_1$	- Flecha de deformação em secção não fendilhada
$a_2$	- Flecha de deformação em secção fendilhada
$b$	- Base da secção
$b'$	- Dimensão da face correspondente ao betão não confinado
$b_f$	- Largura do reforço FRP
$b_w$	- Largura mínima da secção transversal
$c_1$	- Constante obtida por calibração experimental
$c_2$	- Constante obtida por calibração experimental
$d$	- Altura útil da secção
$d'$	- Dimensão da face correspondente ao betão não confinado
$d_2$	- Recobrimento na face superior da secção
$d_j$	- Diâmetro da secção
$f_{cbd}$	- Resistência do betão ao corte
$f_{cc}$	- Resistência à compressão do betão confinado
$f_{cd}$	- Valor de cálculo da resistência do betão à compressão
$f_{ck}$	- Valor característico da resistência do betão à compressão
$f_{cm}$	- Valor médio da resistência do betão à compressão
$f_{co}$	- Valor de cálculo da resistência do betão não confinado à compressão

$f_{ctk}$	- Valor característico da resistência do betão à tracção
$f_{ctm}$	- Valor médio da resistência do betão à tracção
$f_{cu}$	- Tensão última no betão confinado
$f_{fd}$	- Valor de cálculo da resistência do FRP à tracção
$f_{fk}$	- Valor característico da resistência do FRP à tracção
$f_j$	- Resistência última do encamisamento de FRP
$f_l$	- Pressão última de confinamento
$f_{yd}$	- Valor de cálculo da resistência do aço à tracção
$f_{yk}$	- Valor característico da resistência do aço à tracção
$h$	- Altura da secção
$k$	- Factor de redução
$k_b$	- Factor geométrico
$k_c$	- Factor que depende da qualidade do betão
$k_e$	- Coeficiente de eficiência do confinamento
$k_M$	- Coeficiente que depende do tipo de apoio do elemento (viga simplesmente apoiada $k_M=5/48$ )
$l$	- Comprimento do elemento
$l_b$	- Comprimento de ancoragem
$l_{b,max}$	- Comprimento máximo de ancoragem
$s_{rm}$	- Distância média entre fendas
$t_f$	- Espessura da camada de reforço FRP
$t_j$	- Espessura do reforço de confinamento FRP
$u_f$	- Perímetro de aderência do reforço FRP
$x$	- Profundidade do eixo neutro em ULS
$x_0$	- Profundidade do eixo neutro para cargas em serviço antes do reforço
$x_e$	- Profundidade do eixo neutro em SLS
$z$	- Braço do binário de forças na secção

#### *Letras gregas*

$\alpha$	- Factor de redução da tensão de aderência devido à influência de possíveis fendas
$\alpha_e$	- Ângulo que a direcção principal das fibras faz em relação ao eixo do elemento

---

$\alpha_f$	- Coeficiente de homogeneização do FRP em betão
$\alpha_s$	- Coeficiente de homogeneização do aço em betão
$\beta$	- Coeficiente que relaciona o valor médio com o valor característico da largura das fendas
$\beta_1$	- Coeficiente relacionado com as características de colagem
$\beta_2$	- Coeficiente relacionado com o tipo de carregamento
$\beta_p$	- Coeficiente que depende das propriedades do betão
$\gamma_c$	- Coeficiente de segurança do betão
$\gamma_f$	- Coeficiente de segurança do material FRP
$\delta_g$	- Coeficiente que define a posição do centro de gravidade da força de compressão no betão considerando o bloco rectangular de tensões
$\varepsilon_0$	- Extensão na fibra mais afastada à tracção para cargas em serviço antes do reforço
$\varepsilon_2$	- Extensão na armadura longitudinal inferior em regime fendilhado
$\varepsilon_c$	- Extensão na fibra mais afastada à compressão em SLS
$\varepsilon_{c0}$	- Extensão na fibra mais afastada à compressão para cargas em serviço antes do reforço
$\varepsilon_{cc}$	- Extensão de compressão para o pico de resistência de confinamento $f_{cc}$
$\varepsilon_{co}$	- Extensão no betão não confinado para o pico de resistência
$\varepsilon_{cu}$	- Extensão última do betão na fibra mais afastada à compressão em ULS (3,5‰)
$\varepsilon_f$	- Extensão no FRP
$\varepsilon_{f, \text{lim}}$	- Extensão limite do FRP (de 6,5‰ a 8,5‰)
$\varepsilon_{fd}$	- Extensão de cálculo do FRP
$\varepsilon_{fd,e}$	- Valor de cálculo da extensão efectiva do FRP
$\varepsilon_{fe}$	- Extensão efectiva do FRP
$\varepsilon_{fk,e}$	- Valor característico da extensão efectiva do FRP
$\varepsilon_{fu}$	- Extensão última do FRP
$\varepsilon_{fud}$	- Extensão limite última do FRP
$\varepsilon_{fuk}$	- Valor característico da extensão de rotura do FRP
$\varepsilon_j$	- Extensão no encamisamento FRP
$\varepsilon_{ju}$	- Extensão de rotura do encamisamento FRP
$\varepsilon_l$	- Extensão circunferencial do betão (igual à extensão $\varepsilon_j$ )

---



$\varepsilon_{s1}$	- Extensão na armadura longitudinal inferior
$\varepsilon_{s2}$	- Extensão na armadura longitudinal superior
$\varepsilon_{syd}$	- Extensão de cálculo na armadura longitudinal
$\zeta$	- Coeficiente de distribuição de tensões
$\zeta_b$	- Coeficiente de distribuição de tensões
$\eta$	- Factor de redução de resistência do FRP de acordo com o tipo de fibra
$\theta$	- Ângulo das fendas de corte em relação ao eixo do elemento
$\zeta_b$	- Parâmetro de aderência do reforço FRP
$\rho_{eq}$	- Relação longitudinal equivalente de armadura
$\rho_f$	- Percentagem de reforço FRP
$\rho_j$	- Relação volumétrica de reforço FRP
$\rho_{jx}$	- Relação volumétrica de reforço FRP na direcção x
$\rho_{jy}$	- Relação volumétrica de reforço FRP na direcção y
$\sigma_c$	- Tensão no betão
$\sigma_f$	- Tensão no FRP
$\sigma_j$	- Tensão instalada no encamisamento FRP
$\sigma_l$	- Pressão de confinamento lateral
$\sigma_s$	- Tensão no aço
$\tau_b$	- Tensão de corte na interface betão-FRP
$\tau_{fm}$	- Tensão média de aderência do FRP
$\tau_{Rk}$	- Valor característico da resistência ao corte do betão
$\psi$	- Coeficiente que define a resistência efectiva do betão para o diagrama rectangular de tensões

### **Documento do ACI**

#### *Letras maiúsculas latinas*

$C_E$	- Factor de redução ambiental
$A_f$	- Área da secção transversal do reforço FRP
$A_g$	- Área da secção transversal de betão
$A_s$	- Área de aço da armadura longitudinal inferior
$A_{st}$	- Área de aço da armadura longitudinal
$E_c$	- Módulo de elasticidade do betão

$E_f$	- Valor de cálculo do módulo de elasticidade do FRP
$E_s$	- Módulo de elasticidade do aço
$I_{cr}$	- Momento de inércia da secção homogeneizada fendilhada antes do reforço
$I_{cr}$	- Momento de inércia da secção fendilhada
$I_e$	- Momento de inércia efectivo da secção transversal depois de reforçada
$I_g$	- Momento de inércia da secção não fendilhada
$L_e$	- Comprimento de colagem activo
$M_a$	- Momento flector actuante na secção para a combinação Rara de acções
$M_{cr}$	- Momento flector de fendilhação
$M_n$	- Valor de cálculo do momento flector resistente
$M_s$	- Momento flector actuante na secção crítica para a combinação Rara de acções
$M_u$	- Momento flector actuante
$P_n$	- Resistência axial do elemento de betão armado
$V_c$	- Contribuição do betão para o esforço transversal resistente
$V_f$	- Contribuição do reforço FRP para o esforço transversal resistente
$V_n$	- Esforço transversal resistente
$V_s$	- Contribuição do aço para o esforço transversal resistente
$V_u$	- Esforço transversal actuante

*Letras minúsculas latinas*

$b$	- Base da secção
$c$	- Profundidade do eixo neutro
$d$	- Altura útil da secção
$d_f$	- Altura livre da secção onde será colado o reforço
$f_{fu}^*$	- Valor característico da resistência à tracção do FRP
$f_c'$	- Valor da resistência do betão à compressão
$f_{cc}'$	- Resistência à compressão aparente do betão confinado
$f_{f,s}$	- Tensão no reforço FRP
$f_{fe}$	- Tensão efectiva no reforço FRP
$f_{fu}$	- Valor de cálculo da resistência à tracção do FRP
$\overline{f_{fu}}$	- Valor médio da resistência à tracção do FRP
$f_l$	- Pressão de confinamento do encamisamento FRP

$f_s$	- Tensão no aço
$f_{s,s}$	- Tensão no aço para cargas em serviço (SLS)
$f_y$	- Tensão de cedência do aço
$h$	- Altura da secção
$k$	- Coeficiente que multiplicado pela altura útil da secção dá uma aproximação da profundidade do eixo neutro
$k_1$	- Coeficiente de modificação - influência do betão
$k_2$	- Coeficiente de modificação - influência da configuração do reforço
$k_a$	- Factor de eficiência do reforço FRP
$k_m$	- Factor de redução de resistência a aplicar à extensão máxima de cálculo do FRP
$k_v$	- Coeficiente de redução de colagem
$l$	- Comprimento do elemento
$l_b$	- Comprimento de colagem
$n$	- Número de camadas de reforço FRP
$r$	- Raio dos cantos da secção
$s_f$	- Distância entre os pontos médios de dois reforços consecutivos
$t_f$	- Espessura do reforço FRP
$w_f$	- Largura da tira de reforço

#### *Letras gregas*

$\alpha$	- Ângulo que a direcção principal das fibras faz em relação ao eixo do elemento
$\beta_1$	- Coeficiente que permite simular a distribuição não linear de tensões na secção
$\gamma$	- Coeficiente que permite simular a distribuição não linear de tensões na secção
$\delta$	- Flecha a curto prazo
$\varepsilon_{fu}^*$	- Valor característico da extensão máxima do FRP
$\varepsilon_{bi}$	- Extensão na fibra mais afastada à tracção para cargas em serviço antes do reforço
$\varepsilon_{fe}$	- Extensão efectiva no FRP
$\varepsilon_{fu}$	- Valor de cálculo da extensão máxima do FRP
$\varepsilon_s$	- Extensão na armadura ordinária inferior
$\varepsilon_{sy}$	- Extensão de cedência da armadura ordinária
$\lambda_d$	- Flecha a longo prazo

---

$\xi$	- Coeficiente que traduz o efeito da duração da carga
$\rho'$	- Percentagem de armadura de compressão na secção crítica
$\rho_f$	- Percentagem de reforço FRP na secção
$\rho_s$	- Percentagem de aço na secção
$\phi$	- Factor de redução de resistência
$\psi_f$	- Factor de redução de resistência a aplicar à contribuição do reforço FRP

### **Documento do CNR**

#### *Letras maiúsculas latinas*

$A_c$	- Área da secção de betão
$A_f$	- Área da secção transversal do reforço FRP
$A_g$	- Área da secção de betão
$A_s$	- Área de aço da armadura longitudinal
$C_E$	- Factor de redução ambiental
$E_f$	- Valor característico do módulo de elasticidade do FRP
$E_{fib}$	- Valor característico do módulo de elasticidade de uma fibra
$I_0$	- Momento de inércia da secção antes do reforço
$I_1$	- Momento de inércia da secção após o reforço
$M_0$	- Momento flector actuante antes do reforço
$M_{Rd}$	- Momento flector resistente de cálculo
$N_{Rcc,d}$	- Capacidade axial do elemento
$N_{sd}$	- Esforço axial de cálculo
$V_{Rd}$	- Esforço transversal resistente
$V_{Rd,ct}$	- Contribuição do betão para o esforço transversal resistente
$V_{Rd,f}$	- Contribuição do reforço FRP para o esforço transversal resistente
$V_{Rd,max}$	- Esforço transversal resistente máximo
$V_{Rd,s}$	- Contribuição do aço para o esforço transversal resistente
$V_{Sd}$	- Esforço transversal actuante
$X_d$	- Valor de cálculo de determinada propriedade
$X_k$	- Valor característico de determinada propriedade
$\Delta M_1$	- Acréscimo de momento flector após o reforço

*Letras minúsculas latinas*

$b$	- Largura da secção
$b'$	- Dimensão da face correspondente ao betão não confinado
$b_f$	- Largura do reforço FRP
$d$	- Altura útil da secção
$d'$	- Dimensão da face correspondente ao betão não confinado
$d_{min}$	- Menor dimensão da secção transversal
$f_{ccd}$	- Resistência à compressão de cálculo do betão confinado
$f_{cd}$	- Valor de cálculo da resistência do betão à compressão
$f_{ck}$	- Valor característico da resistência do betão à compressão
$f_{ctm}$	- Valor médio da resistência à tracção do betão
$f_{fdd}$	- Valor de cálculo da tensão última de tracção no FRP para a rotura por descolamento nas extremidades
$f_{fdd,2}$	- Valor de cálculo da tensão última de tracção no FRP para a rotura por descolamento intermédio
$f_{fed}$	- Resistência efectiva de cálculo do FRP
$f_{fib}$	- Valor característico da resistência à tracção de uma fibra
$f_{fk}$	- Valor característico da resistência à tracção do FRP
$f_l$	- Pressão de confinamento lateral
$f_{l,eff}$	- Pressão efectiva de confinamento lateral
$h_w$	- Altura livre de secção onde será colado o reforço
$k_{cr}$	- Coeficiente de eficiência
$k_{eff}$	- Coeficiente de eficiência
$k_h$	- Coeficiente de eficiência horizontal
$k_v$	- Coeficiente de eficiência vertical
$k_\alpha$	- Coeficiente de eficiência das fibras
$l_e$	- Comprimento óptimo de colagem
$n$	- Número de direcções das fibras na manta
$p_f$	- Espaçamento entre tiras de reforço consecutivas
$p_t$	- Massa da manta
$r_c$	- Raio dos cantos da secção
$t_{eq}$	- Espessura equivalente da manta de FRP

---

$t_f$	- Espessura de uma camada de reforço FRP
$w_f$	- Largura da tira de reforço FRP
$x$	- Profundidade do eixo neutro
$x_0$	- Profundidade do eixo neutro em serviço antes do reforço

*Letras gregas*

$\alpha_{fE}$	- Coeficiente a aplicar ao módulo de elasticidade do sistema FRP para ter em conta o efeito da resina no compósito após impregnação
$\alpha_{ff}$	- Coeficiente a aplicar ao valor da resistência à tracção do sistema FRP para ter em conta o efeito da resina no compósito após impregnação
$\beta$	- Ângulo que a direcção principal das fibras faz com o eixo do elemento
$\gamma_c$	- Coeficiente parcial de segurança do betão
$\gamma_f$	- Coeficiente parcial de segurança do sistema FRP
$\gamma_{f,d}$	- Coeficiente parcial de segurança do sistema FRP
$\Gamma_{Fk}$	- Valor característico da energia de fractura da interface betão-compósito
$\gamma_m$	- Coeficiente parcial de segurança de determinado material
$\gamma_{Rd}$	- Coeficiente parcial de segurança
$\varepsilon_c$	- Extensão no betão
$\varepsilon_{cu}$	- Valor de cálculo da extensão máxima no betão
$\varepsilon_f$	- Extensão no FRP
$\varepsilon_{f,rid}$	- Extensão de cálculo reduzida do FRP
$\varepsilon_{fd}$	- Valor de cálculo da extensão máxima do FRP
$\varepsilon_{fdd}$	- Valor de cálculo da extensão correspondente ao início do descolamento do FRP
$\varepsilon_{fk}$	- Valor característico da extensão máxima do FRP
$\varepsilon_{sy}$	- Extensão de cedência na armadura longitudinal inferior
$\eta$	- Factor correctivo que depende das condições de exposição do reforço e dos efeitos a longo termo
$\eta_1$	- Factor correctivo que traduz o efeito das cargas a longo prazo no reforço FRP devido aos fenómenos de fluência relaxação e fadiga
$\eta_a$	- Factor correctivo que traduz o efeito das condições ambientais a que está exposto o reforço FRP
$\theta$	- Ângulo que as fendas de corte fazem com o eixo do elemento

$\zeta$	- Critério de ductilidade
$\zeta_{lim}$	- Limite máximo do critério de ductilidade
$\rho_f$	- Proporção geométrica de reforço
$\rho_{fib}$	- Densidade das fibras
$\sigma_f$	- Tensão no sistema FRP em serviço

## Capítulo 1.

### Introdução, Motivação, Objectivos e Estratégia

#### 1.1. Introdução

Há centenas de anos atrás, a pedra e a madeira eram os principais materiais usados na construção de estruturas. Nos últimos duzentos anos o aço estrutural e o betão armado surgiram como principais materiais de construção, sendo as paisagens urbanas mais modernas definidas em grande parte por estes dois materiais. No entanto, o aço e o betão sofrem diversas formas de degradação, estando alguns edifícios e estruturas envelhecidos e degradados.

Nos dias de hoje os engenheiros estão, cada vez mais, à procura de novos materiais que permitam prolongar a vida das estruturas existentes permitindo, ao mesmo tempo, a concepção e construção de novas estruturas duradouras. Os polímeros reforçados com fibras (FRP's – *Fiber Reinforced Polymer*) são uma nova classe de materiais leves, de alta resistência, não corrosíveis e com inúmeras vantagens em relação aos materiais convencionais que surgiu, há cerca de 15 anos, como solução para aplicação na área estrutural.

Existem um pouco por todo o mundo várias especificações técnicas para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de reforço FRP por colagem exterior. Todo um conjunto de investigações, observações e acompanhamento das aplicações práticas dos FRP, nomeadamente pela técnica EBR, possibilitaram a sistematização de modelos de dimensionamento, critérios de verificação de segurança e procedimentos de execução e controlo de qualidade (Silva, 2008). Todo este trabalho deu origem a vários documentos, uns de natureza normativa (normas e guidelines) e outros sob forma de procedimentos de dimensionamento e execução associados a cada fabricante de sistemas FRP, contendo os fundamentos e orientações para dimensionamento e execução de projecto. Desta panóplia de documentos passam-se a enumerar os de maior relevância,



### *Normas e Guidelines*

- a) “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” da *fib* – *fédération internationale du béton* – 2001, (Europa) (*fib*, 2001);
- b) “ACI 440.2R-02 - Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures” do ACI – American Concrete Institute Committee 440 – 2002, (Estados Unidos da América) (ACI 440.2R-02, 2002);
- c) “CNR-DT200/2004 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures” do CNR – Italian National Research Council – 2004, (Itália) (CNR, 2004);
- d) “Recommendations for the Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets” da JSCE – Japan Society of Civil Engineers - 2001, (Japão) (JSCE, 2001);
- e) “Design Manual nº4 – Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally Bonded Fibre Reinforced Polymers” do ISIS – Intelligent Sensing for Innovate Structures – 2001, (Canadá) (ISIS, 2001);
- f) “ISIS Educational Modules 1 to 9 – Strengthening With FRP” do ISIS – Intelligent Sensing for Innovate Structures – 2006, (Canadá) (ISIS, 2006a; ISIS, 2006b; ISIS, 2006c; ISIS, 2006d; ISIS, 2006e; ISIS, 2006f e ISIS, 2006g).

### *Documentos técnicos*

- g) “Sika Carbodur FRP Composites for Repair & Strengthening of Structures” da Sika Poland SP – Março 2003 (Sika, 2003);
- h) “Design Guideline for S&P FRP Systems” da S&P – Clever Reinforcement Company – 2006 (S&P, 2006);
- i) “MBrace Composite Strengthening System – Engineering Design Guidelines” da Master Builders, Inc – 1998 (MBrace, 1998);
- j) “Revitalizing Concrete Structures – Replark Technical Datasheet – Replark Systems Guideline” da Mitsubishi Chemical Corporation – 1997 (Replark, 1997).

O trabalho desenvolvido nesta dissertação centrou-se nas propostas da *fib* (*fib*, 2001), do ACI (ACI 440.2R-02, 2002) e do CNR (CNR, 2004).

## **1.2. Motivação**

A reabilitação e reforço de estruturas é cada vez mais uma realidade e uma prioridade, pelo que o desenvolvimento de novos materiais e técnicas tem cada vez mais importância. Assim, o recurso aos materiais compósitos é cada vez mais frequente, tornando-se necessário normalizar os produtos e sistemas existentes, e criar processos de cálculo adequados para que se consigam resultados positivos.

## **1.3. Objectivos**

Os objectivos desta dissertação passam pela análise crítica e comparativa das recomendações, normas e guidelines existentes sobre o reforço de estruturas de betão com FRP's de forma a identificar quais as lacunas, limitações e metodologias adoptadas.

Pretende-se conhecer os diversos produtos (materiais), sistemas e técnicas de aplicação/reforço com FRP's em estruturas de betão armado e as metodologias de controlo de qualidade dos produtos antes de aplicados e dos sistemas depois de aplicados.

Após adquirido o conhecimento teórico necessário, pretende-se analisar as metodologias de cálculo de reforço à flexão, ao corte e confinamento com sistemas FRP propostos pelas recomendações, normas e guidelines anteriormente analisadas com vista à sua aplicação a uma viga teórica e a um pilar teórico, ambos com necessidade de reforço devido ao um aumento de esforços. Desta aplicação teórica pretende-se inferir conclusões acerca de cada metodologia de cálculo em termos de complexidade de cada método, modelo de análise implícito, qualidade da abordagem, especificidade de cada método e sensibilidades à variação de alguns parâmetros.

## **1.4. Estratégia**

Nesta dissertação estudaram-se os documentos propostos pela *fib*, pelo ACI e pelo CNR. Numa primeira fase, capítulos 2 a 5, fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre os produtos (materiais), técnicas e soluções de reforço estrutural e, por fim, controlo de qualidade do reforço com FRP's, fazendo-se para cada um destes pontos uma confrontação das recomendações, normas e guidelines existentes a fim de saber qual o grau de abordagem de cada uma acerca dos mesmos. Numa fase seguinte, capítulo 6, aplicou-se cada uma das

metodologias de cálculo propostas pelos documentos analisados a uma viga teórica com necessidades de reforço à flexão e ao corte devido a um aumento de esforços provocado pelo aumento da sobrecarga em quatro vezes.

Quanto ao pilar teórico, a sua necessidade de reforço surgiu devido a não ter sido calculado ao sismo. Este foi sujeito a um espectro de resposta de um sismo, de onde foi possível obter os dados que conduziram ao seu reforço.

Por fim, no capítulo 7, para uma viga teórica em condições idênticas às da viga teórica estudada, fez-se variar o momento reduzido da secção, o número de camadas de reforço e a sua disposição de aplicação no elemento a fim de perceber qual a sensibilidade e as modificações resultantes para cada um dos documentos aplicados.

Com este trabalho concluiu-se que existe a necessidade de uniformizar as notações e metodologias de cálculo e verificação propostas pelas diversas normas. Existe também a necessidade de desenvolver documentos mais completos, recorrendo a estudos numéricos fundamentados com estudos experimentais. De uma forma geral, dos documentos analisados pode-se verificar que a proposta apresentada pela *fib* é aquela que se apresenta mais completa e segundo a qual se obtiveram os melhores resultados.

No decorrer desta dissertação houve a necessidade de desenvolver várias folhas de cálculo, modelos de cálculo automático de elementos finitos e outros modelos de análise automática que se tornaram impossíveis de expor ao longo deste trabalho, bem como, alguns dos seus resultados. Em anexo a esta dissertação encontra-se um **CD** onde é possível encontrar todos estes ficheiros devidamente identificados para que o leitor desta dissertação tenha a possibilidade e a liberdade de os poder consultar e analisar. Desta forma, é possível ter acesso a todo o trabalho que não foi exposto de forma directa.

## Capítulo 2.

### Materiais de reforço FRP

Os sistemas FRP são constituídos por materiais (produtos) que possuem propriedades físicas e mecânicas diferentes entre si, surgindo a necessidade de criar métodos e normas que regulem e normalizem os materiais e sistemas disponíveis.

A selecção dos materiais para o reforço é um processo complexo pois todos os sistemas são únicos, sendo as fibras e a resina concebidas para trabalhar em conjunto. Apenas os sistemas testados e aplicados em larga escala no reforço de estruturas de betão devem ser utilizados (*fib*, 2001).

Os compósitos FRP são constituídos por fibras de alta resistência embebidas numa matriz polimérica, podendo-se combinar as propriedades de ambos de forma a atender as necessidades de aplicação. As propriedades do compósito FRP dependem das propriedades dos diferentes constituintes, devendo-se analisar as propriedades das fibras e da matriz, em separado, e só depois analisar as propriedades do compósito FRP como um todo.

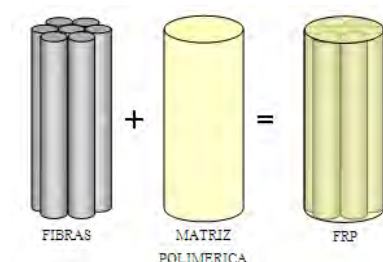


Figura 2.1: Componentes básicos que formam um compósito FRP (adaptado de ISIS, 2006a).

Os sistemas FRP são constituídos essencialmente por materiais de origem polimérica. Estes materiais são a matriz (os saturantes e adesivos), o *primer* (primário), o *puttie* (massa de epoxi niveladora), o revestimento protector e as fibras, que podem ser de vidro, aramida ou carbono.

## 2.1. Matriz polimérica

A matriz para um material compósito pode ser do tipo *termoendurecível* ou do tipo *termoplástica*, sendo o primeiro tipo o mais comum. Um compósito designa-se termoendurecível quando, curado pela acção de calor ou do tratamento químico, se transforma num produto substancialmente infusível (que não se funde) e insolúvel. Por outro lado, um compósito é termoplástico quando se pode tornar, repetidamente, num produto plástico quando aquecido e num produto rígido quando arrefecido (Soares e Martins, 2006).

A matriz é o aglutinante do FRP e desempenha funções importantes como (ISIS, 2006a; Megalooikonomou, 2007; Miller, 1996):

- a) Aglutinar as fibras em conjunto;
- b) Proteger as fibras da abrasão e das agressões ambientais;
- c) Transferir esforços entre cada fibra;
- d) Ser quimicamente, termicamente e mecanicamente compatível com as fibras;
- e) Em materiais unidireccionais, as propriedades da matriz controlam as propriedades transversais do compósito.

A matriz tem grande influência nas propriedades mecânicas do compósito, tais como na rigidez, nas propriedades transversais e nas propriedades em compressão. Uma selecção correcta da matriz para um sistema compósito deve ter em atenção as características físicas e químicas da mesma, sendo importante que o material desta possua uma baixa densidade, geralmente menor que a da fibra, de tal forma que o peso geral do compósito seja minimizado (fib, 2001; ISIS, 2006a).

As resinas de poliésteres, de vinil e de epoxi são as mais usadas nas matrizes poliméricas com fibras de reforço de alta performance. São polímeros termoendurecíveis com boa trabalhabilidade e boa resistência química.

Os poliésteres são os polímeros mais largamente usados na produção dos componentes FRP devido ao seu relativo baixo custo, baixa viscosidade, baixo tempo de cura (cura à temperatura ambiente) e facilidade de aplicação. Em relação aos epoxies, no geral apresentam alta retracção volumétrica e propriedades mais baixas (Fonseca, 2005; Mallick, 1993).

As resinas de vinil são muitas vezes identificadas como uma classe de poliésteres por causa dos seus processos de transformação serem similares. Estas resinas são resistentes aos ácidos fortes e álcalis, têm uma reduzida absorção de humidade e retracção em comparação com o poliéster, baixa viscosidade e baixo tempo de cura. As resinas de vinil são um pouco mais caras que os poliésteres, apresentam uma retracção volumétrica entre 5-10% e uma capacidade resistente de colagem moderada quando comparadas com as resinas epoxi (Fonseca, 2005; Mallick, 1993).

Os epoxies têm, em geral, melhores propriedades mecânicas do que os poliésteres e resinas de vinil, durabilidade excelente e boa capacidade de cura à temperatura ambiente. Estes têm alta resistência, boa estabilidade dimensional, boas propriedades a altas temperaturas e uma forte resistência aos produtos químicos (excepto ácidos). No entanto, o custo é significativamente maior do que o dos poliésteres ou resinas de vinil e o seu tempo de cura é longo (Fonseca, 2005).

#### *2.1.1. Adesivos*

Os adesivos são usados para colar os sistemas FRP laminados pré-curados à face do betão, permitindo a transferência de tensões tangenciais entre as faces do betão e o laminado (ACI 440.2R-02, 2002). O adesivo mais comumente usado é o epoxi, que é o resultado de uma mistura de resina epoxi (polímero) com um endurecedor, podendo ou não conter outros aditivos.

Quando se utilizam adesivos epoxídicos há dois conceitos que precisam ser tomados em consideração, o *Pot-life* e o *Open-time*. *Pot-life* representa o tempo durante o qual se pode trabalhar com o adesivo depois de misturada a resina com o endurecedor, e antes de este começar a endurecer dentro do recipiente; para estes adesivos, o *pot-life* pode variar entre alguns segundos até vários anos. *Open-time* é o tempo que o adesivo, após colocado em cada superfície, tem à disposição antes de ser colado/unido. Os fabricantes não especificam o *open-time* das resinas pois assumem que estas são utilizadas num espaço de tempo próximo da abertura.

Outro parâmetro importante a considerar é a temperatura de transição vítrea (*glass transition temperature*),  $T_g$ , definida como sendo a mudança dos polímeros do estado

sólido, elástico ou como vidro para materiais com características similares à borracha, e que ocorre para temperaturas entre 85-340°C para os diferentes polímeros (Mallick, 1993).



Figura 2.2: Resina epoxi (adaptado de Megalooikonomou, 2007).

Algumas vantagens dos adesivos epoxídicos usados na Engenharia Civil são (fib, 2001):

- Alta actividade superficial e boas propriedades de impregnação para várias bases;
- Podem ser formulados de maneira a terem um grande *open-time*;
- Cura com alto esforço de coesão;
- Pode ser misturado com a inclusão duma fase dispersa de borracha;
- Baixa retracção em comparação com poliésteres, acrílicos e vinis;
- Baixa fluência;
- Pode ser feito com características tixotrópicas para aplicação em superfícies verticais;
- Tem a capacidade de acomodar superfícies de colagem irregulares ou espessas.

As propriedades típicas dos adesivos epoxi de cura a frio usados nas aplicações de engenharia civil podem ser encontradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Comparação das propriedades típicas dos adesivos epoxi, betão e aço macio (adaptado de fib, 2001).

Propriedades (a 20°C)	Adesivo epoxi de cura a frio	Betão	Aço macio
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1100 – 1700	2350	7800
Módulo de Young (GPa)	0,5 – 0,2	25 – 45	200 - 210
Módulo de distorção (GPa)	0,2 – 8	0,2	0,3
Coefficiente de Poisson	0,3 – 0,4	0,2	0,3
Resistência à tracção (MPa)	9 – 30	1 – 5	200 - 600
Resistência ao corte (MPa)	10 – 30	2 – 5	200 - 600
Resistência à compressão (MPa)	55 – 110	25 – 150	200 - 600
Deformação na rotura por tracção (%)	0,5 – 5	0,015	25
Energia de rotura aproximada (Jm <sup>-2</sup> )	200 – 1000	100	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	25 -100	11 – 13	10 - 15
Temperatura de transição vítrea (°C)	45 – 80	-	-

### 2.1.2. Primers (primário)

O primário geralmente é constituído por um epoxi claro de baixa viscosidade e alto teor de sólidos, que é usado para penetrar na superfície do betão proporcionando uma melhor

adesão de colagem à resina de saturação ou adesivo. A superfície deve ser limpa para remover os vestígios de nata de cimento, impurezas e gorduras (ACI 440.2R-02, 2002).

#### 2.1.3. *Puttie filler (massa de epoxi niveladora)*

A massa de epoxi niveladora é usada para preencher espaços vazios, furos, fissuras e irregularidades de planeza de forma a proporcionar uma superfície lisa onde se possa colar o FRP e para evitar a formação de bolhas durante a cura da resina de saturação (ACI 440.2R-02, 2002).

#### 2.1.4. *Resina de Saturação*

A resina de saturação é usada para impregnar as fibras de reforço, fixá-las e proporcionar um caminho eficaz para a transferência de tensões tangenciais entre as mesmas. Esta resina também serve como adesivo dos sistemas *wet-lay-up*, fornecendo um caminho de transferência de tensões tangenciais entre a face do betão e o sistema FRP (ACI 440.2R-02, 2002).

#### 2.1.5. *Revestimento Protector*

O revestimento protector é usado como acabamento estético ou como protecção contra impactos, fogo, exposição a químicos ou raios ultravioleta, humidade e vandalismo (Mirmiran e Shahawy, 2008). A protecção é aplicada na face exterior do sistema FRP curado, proporcionando uma melhoria do efeito estético (ACI 440.2R-02, 2002). Geralmente possui alto teor de sólidos, alto brilho e boa resistência à corrosão.

Na Figura 2.3 pode-se ver a sequência de aplicação dos materiais poliméricos.

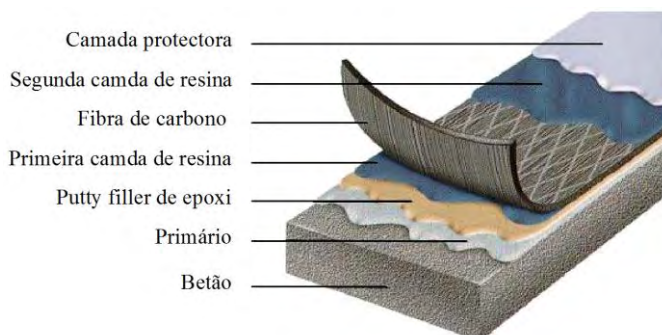


Figura 2.3: Ordem de aplicação dos materiais poliméricos (adaptado de BASF, 2007).



## 2.2. Fibras

As fibras são o principal constituinte num sistema compósito de FRP. Ocupam grande parte do volume, partilham grande parte da carga que actua na estrutura do compósito e são as responsáveis pela resistência e rigidez dos compósitos. É importante uma selecção correcta do tipo, quantidade e orientação das fibras pois influenciam as seguintes características de um compósito laminado (Mallick, 1993):

- a) Peso específico;
- b) Resistência e módulo de elasticidade à tracção/compressão;
- c) Resistência à fadiga e os mecanismos de rotura por fadiga;
- d) Custo.

As fibras mais comumente usadas nos sistemas FRP para aplicação em engenharia civil são fibras contínuas de vidro (G), aramida (A) (Kevlar (K)) e carbono (C). A adequação das várias fibras às aplicações em específico depende da necessidade de resistência, de rigidez, das considerações de durabilidade, do custo e da disponibilidade de componentes e materiais (ISIS, 2006a). A Figura 2.4 mostra o comportamento à tracção de vários tipos de fibras.

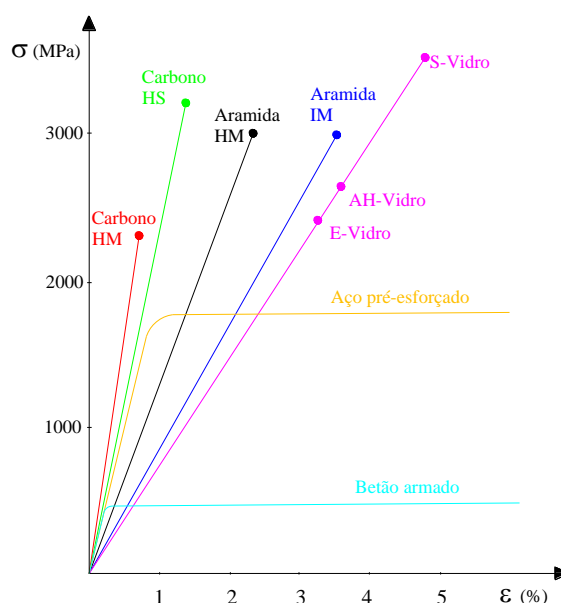


Figura 2.4: Comportamento à tracção de fibras e outros materiais (adaptado de ACI 440R-96, 2002).

### 2.2.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro (G) são produzidas por um processo chamado fusão directa onde as fibras, com um diâmetro de 3 a 25 microns, são formadas por um processo rápido e contínuo de extracção por fusão do vidro (Mallick, 1993). As principais vantagens são a resistência à temperatura, transparência, isotropia de expansão térmica, boa aderência às matrizes poliméricas, boa resistência química e boa razão características mecânicas/preço. Existem várias categorias de fibras de vidro mas as mais comuns são as *E-glass* e as *S-Glass*, sendo estas últimas mais caras mas mais resistentes. Como principais limitações apresenta grande susceptibilidade a danos da superfície e características mecânicas específicas inferiores às dos outros tipos de fibras, especialmente em termos de módulo de elasticidade (Fonseca, 2005).

As fibras de vidro são muitas vezes escolhidas para aplicações que tolerem aumentos de massa (os FRP's de vidro são mais pesados que os de carbono ou aramida) e que tolerem grandes desvios (devido às extensões) resultantes do seu baixo módulo elástico (ISIS, 2006a).

### 2.2.2. Fibras de aramida

As fibras de aramida (A) (Kevlar (K)) são produzidas a partir de um composto sintético chamado poliamida aromática por um processo de extrusão e fiação. A rigidez pode variar de 83GPa a 186GPa consoante sejam fibras de baixo módulo ou fibras de elevado módulo, respectivamente. As fibras de aramida são caracterizadas pela elevada resistência específica em tracção, excelente resistência ao choque, vibrações e desgaste, módulo de elasticidade moderado, baixa densidade e bom comportamento ao fogo. Em contrapartida, possuem baixa resistência à compressão e às tensões tangenciais, devido às propriedades anisotrópicas das fibras, à sensibilidade aos raios ultravioleta (UV), à má resistência química aos ácidos fortes concentrados e à elevada absorção de humidade (Fonseca, 2005; ISIS, 2006a).

### 2.2.3. Fibras de carbono

As fibras de carbono (C) são produzidas por um processo chamado pirólise controlada, onde as fibras resultantes podem ter propriedades que variam largamente e, por isso,

existem várias classes de fibras de carbono diferenciadas com base no módulo de elasticidade:

- a) Standard, 250 – 300 GPa;
- b) Intermédia, 300 – 350 GPa;
- c) Alta, 350 – 550 GPa;
- d) Ultra-alta, 550 – 1000 GPa.

As principais vantagens das fibras de carbono são o seu alto módulo de elasticidade, excelentes características mecânicas em tracção e compressão, baixa densidade, boa estabilidade dimensional (coeficiente de expansão térmica baixo) e boa resistência térmica, química e aos agentes ambientais. Estas fibras são ideais para aplicação em estruturas sensíveis ao aumento de peso ou deformações (ISIS, 2006a). As desvantagens que apresentam são a sensibilidade ao choque, fraca resistência à abrasão, corrosão do tipo galvânico quando em contacto com metais e ataque pelo oxigénio do ar a temperaturas superiores a 400°C (Fonseca, 2005)

Na Tabela 2.2 apresentam-se os diferentes tipos de fibra anteriormente indicados e as respectivas características (ACI 440.2R-02, 2002).

Tabela 2.2: Tipos de fibras e suas propriedades (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002; Fonseca 2005).

<i>Tipo de fibra</i>	<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	<i>Resistência última (MPa)</i>	<i>Tensão de rotura (%)</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>
<i>Carbono</i>				
Normal	220-235	<3790	>1,2	1,90
Alta resistência	220-235	3790-4825	>1,4	1,90
Ultra alta resistência	220-235	4825-6200	>1,5	1,90
Alto módulo	345-515	>3100	>0,5	2,00
Ultra alto módulo	515-690	>2410	>0,2	2,15
<i>Vidro</i>				
E-Vidro	69-72	1860-2685	>4,5	2,60
S-Vidro	86-90	3445-4825	>5,4	2,48
<i>Aramida</i>				
Normal	69-83	3445-4135	>2,5	1,44
Alta performance	110-124	3445-4135	>1,6	1,47

### 2.3. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação aos materiais

Após a análise da norma “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” da *fib*, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening

concrete structures” do ACI Committee 440, do módulo educacional 2 – “Introduction to FRP composites for construction” do ISIS-Canada e da “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures” do CNR podem-se fazer alguns comentários acerca da abordagem da mesmas em relação aos materiais empregues nos sistemas FRP.

A norma da *fib*, no capítulo 2, faz referência aos materiais usados no reforço com FRP's. Menciona os adesivos dando uma noção da sua função e das características de que depende o seu bom desempenho. Esta apenas aprofunda com mais detalhe o adesivo epoxi, dado ser o mais comumente usado. Introduce os conceitos de *pot-life*, *open-time* e temperatura de transição vítrea (*glass transition temperature*) que são muito importantes. Em relação à matriz, faz um enquadramento sintético e claro das suas características, funções e tipos. Refere também, quais os tipos de materiais existentes para as matrizes e especifica o mais usado. Esta norma não faz referência à utilização e não especifica nada sobre *primers*, *puttie fillers*, resinas de saturação e revestimentos protectores. Em relação às fibras, faz uma descrição sintética dos tipos de fibras existentes e algumas das suas características. Apresenta um quadro resumo com as propriedades típicas das fibras.

A guideline do ACI é um pouco vaga em relação aos materiais. Foca pontos que as outras duas publicações não focam mas fá-lo de uma forma muito superficial. Esta guideline faz referência a vários tipos de resina mas não detalha nenhum deles. No entanto, indica as características que as resinas devem possuir. Em relação à matriz, nada é dito. Existe uma ligeira mistura do conceito de matriz com o conceito de resina, sendo os tipos de matrizes e suas propriedades mencionados nas resinas. A alusão feita aos *primers*, *putty fillers*, adesivos de saturação e revestimentos protectores é também muito superficial, baseando-se na transmissão da sua simples existência. Quanto às fibras, apenas são referidos os tipos de fibras existentes e suas propriedades, em anexo à norma, na forma de quadro resumo.

O módulo educacional canadiano refere, de forma curta e explicita, as funções da matriz polimérica e quais os tipos de resinas que são mais comuns usar nas matrizes e suas características. Em relação aos adesivos, esta engloba-os nas matrizes falando nos tipos de resinas possíveis de serem usadas. Quanto aos *primers*, *puttie fillers*, resinas de saturação e revestimento protector nada é dito. Quanto às fibras, refere os tipos existentes, descreve as suas funções e respectivas propriedades.

De todos os documentos anteriormente analisados, o documento proposto pelo CNR é o mais completo no que respeita à abordagem sobre os vários tipos de materiais de reforço FRP. No seu capítulo 2 são abordadas as características dos compósitos e seus constituintes, de forma bastante abrangente, caracterizando os compósitos em geral e dando exemplos dos mais comuns e das suas propriedades. Em relação as fibras usadas nos compósitos, são apresentados os tipos existentes no mercado e a forma como estas são comercializadas, sendo para os três tipos de fibras mais comuns (carbono, vidro e aramida) feita uma caracterização bastante detalhada. Quanto à forma dos compósitos, são apresentadas as comumente disponíveis no mercado.

No respeitante à matriz polimérica, são apresentados os tipos de resinas mais usados e exemplos de fichas técnicas que as devem acompanhar, para que se consiga uma boa caracterização das mesmas.

## Capítulo 3.

### Sistemas e produtos FRP

Na abordagem dos sistemas e produtos FRP importa perceber qual a diferença entre ambos os conceitos. Define-se produto como sendo um elemento produzido para a reparação e o sistema como sendo a mistura de um ou mais produtos ou a utilização consecutiva de dois ou mais produtos. Como exemplo, no caso dos compósitos FRP, o laminado e o adesivo (ou a manta e a resina de impregnação) são os produtos, ao passo que o sistema é o compósito obtido pela ligação do laminado com o adesivo (ou da ligação da manta com a resina) (Azevedo, 2008).

#### 3.1. Sistemas FRP de colagem exterior

Existem diferentes sistemas de reforço com FRP por colagem exterior (FRP-EBR) que podem ser divididos, de uma forma geral, em sistemas curados *in-situ* (*wet-lay-up* e *prepreg*) e sistemas pré-fabricados ou pré-curados (*pre-cured*) (fib, 2001). A configuração geométrica e espacial e a disposição das fibras permitem ainda classificar estes sistemas segundo três grupos: unidireccionais (1D), bidireccionais (2D) e multidireccionais (3D) (ACI 440R-96, 2002; Juvandes e Costa, 2002).

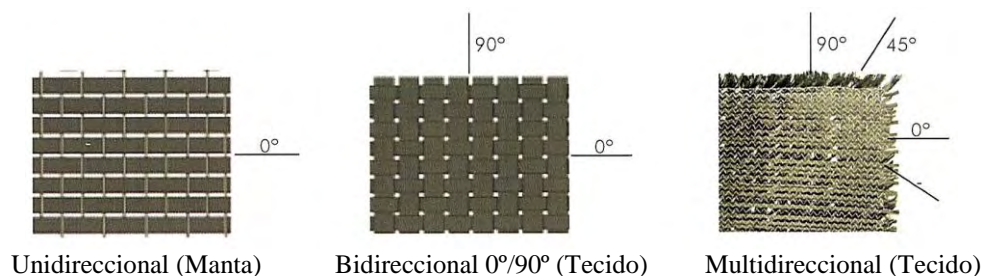


Figura 3.1: Possíveis orientações das fibras (adaptado de Marques, 2008).

### 3.1.1.1. Sistemas curados *in-situ*

Nos sistemas FRP curados *in-situ* – *wet-lay-up*, a matriz e as fibras são fornecidas em separado e o processo de fabrico do compósito FRP (matriz + fibras) é efectuado na zona de aplicação do sistema. Os sistemas curados *in-situ* são classificados, em termos da direcção que as fibras apresentam, em mantas (fibras dispostas unidireccionalmente) e tecidos (fibras dispostas em várias direcções), como se pode ver na Tabela 3.1 (Barros, 2004).

Os tecidos e mantas podem ser postos directamente na resina previamente aplicada uniformemente na superfície de betão ou impregnados com resina numa máquina de saturação e aplicados à superfície de betão previamente impregnada com primário (*primer*) ou resina (*fib*, 2001). A espessura final de um compósito curado *in-situ* é inferior à espessura de um compósito pré-fabricado e é difícil de ser determinada.

Os sistemas curados *in-situ* – *prepreg* são semi-produtos de pequena espessura constituídos por fibras pré-impregnadas de resina dispostas unidireccionalmente ou cruzadas que apresentam consistência viscosa e são fornecidos em forma de rolo (Fonseca, 2005). A sua aplicação é feita directamente na superfície de betão previamente impregnada, ou não, com primário ou resina.

Tabela 3.1: Descrição dos produtos usados nos sistemas FRP curados *in-situ* (adaptado de Juvandes e Costa, 2002).

Designação	Descrição	Orientação das fibras	Estado
Mantas “sheets”	Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de protecção. (200 – 300 g/m <sup>2</sup> )	Unidireccionais	Secas
“Woven roving”*	Entrelaçamento direccionado de dois fios ou faixa de fibras. (600 – 800 g/m <sup>2</sup> )	Bidireccionais: 0/+90° 0/+45° 0/-45°	Pré-impregnadas**
Tecidos “fabrics”	“Mat”* Espalhamento aleatório das fibras num tapete rolante que, depois, é pulverizado com resina para adquirir consistência.	Multidireccional	Secos
“Cloth”*	Fios contínuos tecidos por um processo têxtil convencional. (150 – 400 g/m <sup>2</sup> )	Unidireccional ou Bidireccional ou Multidireccional	Pré-impregnados**

\* - designação internacional para o arranjo das fibras;

\*\* - aplicação de uma camada suave de resina sem a cura total, para criar alguma coesão entre as fibras (estado *prepreg*).

Na Tabela 3.2 encontram-se alguns tipos de mantas e tecidos existentes no mercado e na Tabela 3.3 encontram-se as resinas utilizadas na sua aplicação.

Tabela 3.2: Propriedades de algumas mantas /tecidos de FRP comerciais.

Fabricante	Produto	Tipo de fibra	Resistência da fibra (MPa)	Rigidez da fibra (GPa)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Espessura do tecido (mm)	Direcção das fibras	Método de aplicação
A	A.S.1	Carbono	4100	230	1,76	0,122	Unidireccional	Seco
	A.S.2	Carbono	3800	230	1,75	0,046	Bidireccional	Seco
	A.S.3	Vidro-E	2300	76	2,56	0,360	Unidireccional	Seco
	A.S.4	Aramida	2800	100	1,44	0,210	Unidireccional	Seco
B	B.S.1	Carbono	4900	230	1,80	0,117	Unidireccional	Seco/húmido
	B.S.2	Carbono	4900	230	1,80	0,176	Unidireccional	Seco/húmido
	B.S.3	Aramida	2100	120	1,44	0,286	Unidireccional	Seco
C	C.S.1	Carbono	3800	240	1,70	0,117	Unidireccional	Seco/húmido
	C.S.2	Vidro-E	3400	73	2,60	0,154	Unidireccional	Seco
	C.S.3	Aramida	2900	120	1,45	0,200	Unidireccional	Húmido

Tabela 3.3: Propriedades de algumas resinas para aplicação das mantas e tecidos acima referidos.

Fabricante	Produto	Função da resina	Temperatura de aplicação (°C)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)	Pot-life (min./°C)
A	A.R.1	Primário/impregnação	+15 a +40	45	3500	240/+23
	A.R.2	Primário/impregnação	+10 a +35	30	4500	60/+23
B	B.R.1	Primário	-	12	593	20/+25
	B.R.2	Impregnação	>+5	17	2800	76/+25
C	C.R.1	Primário/impregnação	+8 a +35	35	-	45/+20

### 3.1.2. Sistemas pré-fabricados

Os sistemas pré-fabricados são obtidos pela impregnação de um conjunto de feixes de fibras contínuas com uma resina termoendurecível, cuja orientação unidireccional e o esticamento das fibras conferem ao sistema a maximização da resistência e da rigidez na sua direcção longitudinal. O laminado é a forma comercial mais corrente, com espessuras a variar entre 1,0 e 1,4 mm (Juvandes e Costa, 2002). Os sistemas curados *in-situ* têm a vantagem do maior controlo de qualidade, uma vez que só as propriedades do adesivo são afectadas pela execução (Araújo, 2002).

Tiras/Laminado



Ângulos



Encamisamentos



Varões

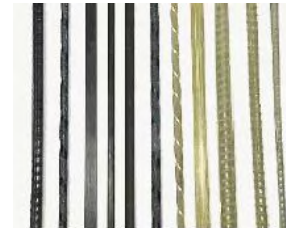


Figura 3.2: Exemplos de sistemas FRP pré-fabricados (adaptado de Changzhou, 2008; Cruz e Barros, 2002; Fonseca, 2007; Sika, 2003, respectivamente).



Na aplicação destes sistemas, normalmente é usado um adesivo juntamente com o primário e, eventualmente, se necessária massa cimentícia para colar as formas pré-curadas à superfície de betão.

Na Tabela 3.4 encontram-se descritos alguns tipos de laminados pré-fabricados de carbono existentes no mercado. Nas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam-se as resinas empregues na colagem dos sistemas laminados descritos.

Tabela 3.4: Propriedades dos laminados CFRP comerciais.

Fabricante	Sistema de reforço	Módulo de elasticidade* (GPa)	Resistência à tracção* (MPa)	Alongamento na rotura mínimo* (%)	Conteúdo volumétrico em fibras (%)
A	Laminado	A.S.1	165	>2800	>1,70
		A.S.2	210	>2900	>1,35
B	Laminado	B.S.1	158	2200	1,30
		B.S.2	190	2900	1,40
C	Laminado	C.S.1	170	>3100	2,00
		C.S.2	200	3300	1,40

\* - valor característico.

Tabela 3.5: Principais características da resina epoxi de colagem – A.R.1.

Principais características da resina epoxi de colagem – A.R.1	
Componentes	A – Branco; B – Preto
Proporções	Mistura cinza claro
Massa volúmica	Comp. A : Comp. B=3:1 (partes em peso ou em volume).
Pot-life (vida da mistura)	1,77 Kg/l (A+B)
Tempo aberto (adesividade após aplicação)	40 minutos, a 35°C
Retracção	30 minutos, a 35°C
Ponto de transição para a verificação	0,04%
Módulo de elasticidade estático	62°C
Tensão de aderência (húmido)	12800 MPa
Resistência ao corte	Rotura coesiva do betão (4 MPa)
Coefficiente de expansão	Rotura coesiva do betão (15 MPa)
	$9 \times 10^{-5}$ por °C (-10°C a +40°C)

Tabela 3.6: Principais características da resina epoxi de colagem – B.R.1.

Principais características da resina epoxi de colagem – B.R.1	
Densidade 20°C	$\approx 1,7 \text{ g/cm}^3$
Tempo de mistura	Mínimo 3 minutos
Pot-life (tempo de trabalhabilidade)	$\approx 80$ minutos
Endurecimento total após	$\approx 3$ dias
Temperatura de aplicação (suporte e material)	+5°C até +30°C
Resistência à tracção	Rotura do betão (1,8 MPa)
Resistência ao corte	a 50°C 116 MPa
Resistência à compressão	95 MPa
Módulo de elasticidade à flexão	7940 MPa
Temperatura de transição vítrea	51,3°C
Tensão de aderência	Rotura pelo betão (9 MPa)
Coefficiente de expansão	$35,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$

Tabela 3.7: Principais características da resina epoxi de colagem – C.R.1.

Principais características da resina epoxi de colagem – C.R.1	
Componentes	A – Cinzento; B – Branco Mistura cinza claro
Proporções	Comp. A : Comp. B=3:1 (partes em peso ou em volume).
Peso específico	1,55 g/cm <sup>3</sup> (A+B)
Temperatura de aplicação	+5°C a +30°C
Aderência ao betão	>3 MPa
Módulo de elasticidade	6500 a 7000 MPa

### 3.2. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação aos sistemas FRP

Após a análise da norma “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” da *fib*, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures” do ACI Committee 440, do módulo educacional – “Introduction to FRP composites for construction” do ISIS-Canada e da “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures” do CNR podem-se fazer alguns comentários acerca da abordagem da mesmas em relação aos sistemas FRP.

A norma da *fib*, no capítulo 2, não fala dos processos de manufactura, refere que saem do âmbito do documento. Fala nos dois grandes grupos de sistemas e, para cada um deles, refere os produtos existentes (mantas, tecidos, disposição das fibras, etc.) e o modo como podem ser aplicados.

O módulo educacional canadiano aborda os processos de manufactura de forma simples mas muito clara. No entanto, não faz nenhuma descrição dos produtos existentes, apenas refere o tipo de produto que resulta de cada processo de produção. Em relação aos sistemas, refere os dois grandes grupos, curados *in-situ* e os pré-fabricados. Apresenta também, as principais características de alguns sistemas existentes no mercado.

A guideline ACI 440.2R-02 refere os dois grandes grupos de sistemas existentes e seus produtos. Esta guideline diferencia os sistemas curados *in-situ* no que respeita a sistemas secos ou pré-impregnados. Esta guideline remete-nos para a ACI 440R-96 onde são especificados a pormenor estes sistemas e, principalmente, os seus constituintes.

O documento do CNR no seu capítulo 2 fala dos sistemas para reforço FRP, centrando-se nos três tipos de sistemas existentes: os pré-fabricados; os curados *in-situ* e os pré-

impregnados. Para cada um destes é feita uma breve descrição, são apresentadas as principais características mecânicas e exemplos de fichas técnicas que os devem acompanhar.

Em anexo são apresentadas e explicadas as diferentes técnicas de manufacção existentes, bem como o comportamento mecânico dos compósitos.

Uma grande lacuna que existe hoje em dia em todas as normas e guidelines é o facto de estas não regularem ou definirem intervalos de valores para as características dos constituintes dos sistemas, nem definirem as características a apresentar bem como as suas unidades. Cada fabricante tem o seu produto com as suas características em termos de resistência, módulo de elasticidade, alongamento na rotura, temperatura de aplicação, tempo de vida, etc. Devido a este facto cada resina, cada primário e cada tipo de fibra, têm propriedades singulares e por isso, sistemas idênticos têm características, por vezes, muito diferentes. Um outro aspecto muito importante que não é abordado é a forma de apresentação, por parte dos fabricantes, das características dos produtos e das suas unidades. Ao fazer a pesquisa dos produtos anteriormente mencionados pode-se verificar que cada fabricante apresenta as características que acha importantes e com as unidades usadas no país onde se encontra, não usando as unidades no sistema internacional, *SI*. Desta forma torna-se difícil comparar produtos de fabricantes diferentes pois não se possui valores com as mesmas unidades nem com as mesmas características base.

A indústria deste tipo de materiais esta em contínuo desenvolvimento, pelo que os materiais e produtos que são desenvolvidos possuem cada vez melhores características e são cada vez mais diversificados. Sugere-se então que as normas e guidelines estabeleçam valores em forma de intervalos ou valores mínimos para as características destes materiais/produtos de forma a poderem acompanhar o desenvolvimento dos mesmos e assim, de alguma forma, normalizar essas mesmas características. Para a determinação dos referidos intervalos de valores e, principalmente, dos valores mínimos e principais características, devem ser adoptados métodos de ensaio normalizados e seguidas normas de ensaio. A norma ACI 440K, do ACI Committee 440, apresenta modelos de métodos de ensaio para determinar as propriedades mecânicas a curto prazo e a longo prazo, determinar propriedades termo-mecânicas e ensaios de durabilidade de varões, mantas e tecidos de FRP (ACI 440K, 2001).

## Capítulo 4.

### Técnicas de reforço

As técnicas de reforço com sistemas FRP podem ser divididas em dois grupos: os sistemas FRP-EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) onde o sistema é colado exteriormente e os sistemas FRP-NSM (*Near-Surface Mounted Reinforcement*) onde o sistema é inserido em ranhuras feitas no elemento a reforçar.

A técnica mais usada no reforço de elementos de betão é a FRP-EBR, cuja aplicação envolve essencialmente três tarefas (Barros, 2004):

- a) Preparação da superfície do elemento a reforçar de forma a garantir que a base tenha boas condições de aderência. No caso do sistema curado *in-situ* a superfície deve ser esmerilhada, enquanto no caso dos laminados a superfície do elemento deve ser boiardada com jacto de areia ou ser “picotada” com um martelo de agulhas. Seguidamente, a superfície tratada deve ser limpa com ar comprimido;
- b) Aplicação e colagem do reforço;
- c) Controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação.

As aplicações dos reforços com sistemas FRP são variadas sendo indicados para todo tipo de estruturas desde edifícios, pontes, túneis, marinas, aumento de ductilidade, etc. Este tipo de sistemas é usado quando é necessário efectuar o reforço das estruturas à flexão, ao corte, ao impacto, controlo de fissuração, reforço à acção sísmica, confinamento, etc., sem aumento significativo das secções e, consequentemente, sem o aumento indesejado da inércia (Soares e Martins, 2006).

#### 4.1. Reforço de lajes

As lajes podem apresentar a necessidade de reforço à flexão devido à aplicação de cargas para as quais não foram dimensionadas, devido a deformações excessivas, à ocorrência de

fendilhação ou quando se pretende fazer aberturas nos panos de laje. O reforço pode ser orientado numa direcção ou em duas direcções (Figura 4.1 a), sendo que a aplicação de fibras ao longo da face inferior da laje melhora a capacidade de carga, diminui a deformação da laje (quando pré-esforçada), melhora a resistência e permite controlar a fendilhação. Quando o reforço é unidireccional, a orientação das fibras deve ser paralela à direcção do maior esforço e perpendicular às fendas.

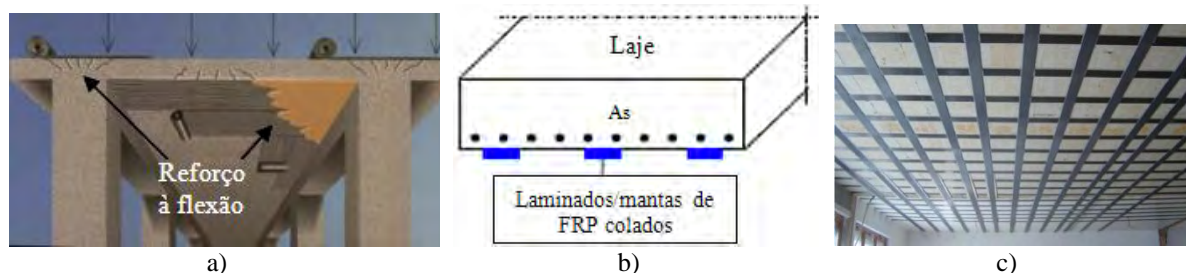


Figura 4.1: Reforço de lajes à flexão (a) - adaptado de BASF, (2007);  
b) - adaptado de Juvandes e Costa, (2002); c) - adaptado de Motavalli, (2008)).

O reforço das lajes à flexão pode ser feito com laminados, mantas ou tecidos. No caso dos laminados, estes são colados à laje com uma resina epoxi podendo ser, ou não, ancorados nas pontas para evitar o descolamento da tira. Os laminados podem ser aplicados paralelamente ou ortogonalmente, conforme mostra a Figura 4.1 c). As mantas e tecidos fazem parte dos sistemas curados *in-situ*, os quais são impregnados com uma resina e depois aplicados à face do betão. Podem ser aplicadas várias camadas de forma a conseguir a resistência necessária, fazendo sempre a impregnação das diversas camadas de reforço (fib, 2001; ISIS, 2006f).

## 4.2. Reforço de vigas

As vigas são elementos que estão sujeitos a esforços de flexão e corte, e, como tal, podem necessitar de reforço se as acções a que estão sujeitas ultrapassarem os seus valores de dimensionamento, se as deformações forem excessivas ou se existir ocorrência de fendilhação.

*Reforço à flexão* – O reforço de vigas à flexão permite aumentar a resistência a esta, aumentar a rigidez, diminuir a flecha e controlar ou eliminar fendas, bem como, aumentar ligeiramente a ductilidade. A Figura 4.2 a) mostra a flecha em função da carga aplicada a vigas com diferentes tipos de reforço e sem reforço. O reforço de vigas à flexão é conseguido através da colagem de laminados, mantas ou tecidos na face inferior da viga

(Figura 4.2 b). Uma outra técnica de reforço à flexão de vigas é a aplicação de sistemas FRP-NSM, onde se inserem tiras ou barras de FRP em pequenas ranhuras feitas na base da viga e na direcção do maior esforço (Figura 4.2 c). Esta técnica é usada quando se necessita de maiores capacidades resistentes, já que a capacidade de ancoragem do sistema é muito maior, ou quando há necessidades de resistir a danos provocados por altas temperaturas, fogo, raios UV ou colisões (Motavalli e Czaderski, 2007; Szabó e Balázs, 2007). No caso de vigas com grandes deformações ou vigas que irão experimentar grandes cargas, pode-se recorrer ao reforço com laminados colados pré-esforçados.

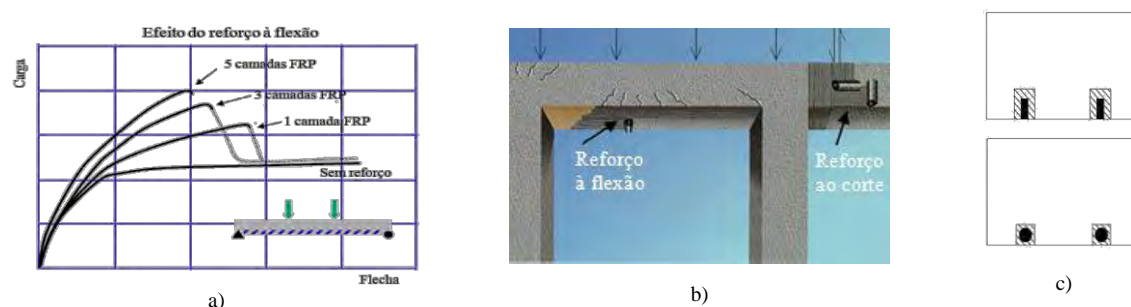


Figura 4.2: a) - Comportamento de uma viga com reforço e sem reforço à flexão (adaptado de BASF, 2007);  
b) - Reforço de vigas à flexão e ao corte (adaptado de BASF, 2007);  
c) - Sistema NSM (adaptado de Szabó e Balázs, 2007).

**Reforço ao corte** – O reforço de vigas ao corte permite aumentar a resistência ao esforço transversal, aumentar a rigidez e controlar ou eliminar fendas, bem como, aumentar a ductilidade. O reforço ao corte pode ser conjugado com o reforço à flexão, pois ao ser eliminada a possibilidade de rotura da viga por corte esta poderá romper por flexão e vice-versa. A Figura 4.3 a) mostra a flecha em função da carga aplicada a vigas com diferentes tipos de reforço e sem reforço.

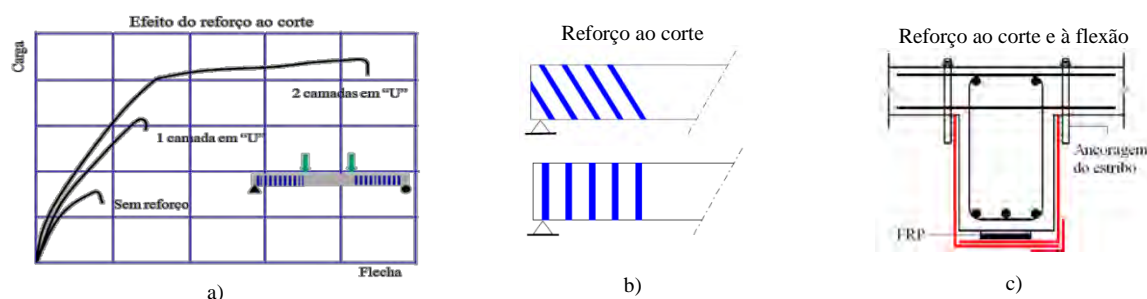


Figura 4.3: a) - Comportamento de uma viga com reforço e sem reforço ao corte (adaptado de BASF, 2007);  
b) - Reforço ao corte (adaptado de Juvandes e Costa, 2002); c) - Reforço ao corte e à flexão (adaptado de Juvandes e Costa, 2002).

O reforço ao corte deve ser feito com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte. Este reforço ao corte, que é muitas vezes necessário para aumentar a ductilidade em flexão, pode ser colocado de forma contínua ao longo da viga ou em faixas com espaçamento limitado. O reforço pode ser feito com laminados pré-fabricados com formas em “L” ou “U” (Figura 4.3 b e c), colados na viga com resinas epoxi e ancorados nas pontas, quando necessário, ou feito com sistemas curados *in-situ*, mantas ou tecidos, que são colados na viga com as fibras orientadas perpendicularmente ao seu eixo (Figura 4.2 b).

A aplicação do reforço pode ser feita de três formas, dependendo da geometria da viga, da liberdade existente nas suas faces e do tipo de sistema usado. Assim, o reforço pode ser aplicado apenas nas duas faces laterais da viga; pode ser aplicado em forma de “U”, cobrindo as duas faces laterais e a base da viga; ou então pode ser aplicado de forma a envolver todas as faces da viga (Figura 4.4). Em muitos casos, o comportamento do reforço aplicado nas três faces é considerado idêntico ao aplicado nas quatro faces. Das três formas de reforço apresentadas, a mais eficaz é aquela onde o reforço envolve todas as faces do elemento.



### 4.3. Reforço de pilares

A acção sísmica leva à necessidade de reforçar os pilares através do confinamento, o qual proporciona um aumento de resistência axial e melhoria da ductilidade.

*Reforço à flexão* – O reforço de pilares à flexão permite aumentar a resistência à flexão, a rigidez e a ductilidade. O reforço à flexão pode ser conjugado com o reforço por confinamento como se mostra na Figura 4.5 a), conseguindo-se ganhos consideráveis na resistência à flexão, resistência axial e na ductilidade. O reforço à flexão pode ser feito pela colagem de laminados, pela colagem de barras e cascas pré-fabricadas ou pela aplicação de

mantas ou tecidos colados externamente no pilar. O reforço com laminados é feito por colagem destes no pilar com resinas epoxi, com a direcção das fibras orientada paralelamente ao eixo do pilar. O reforço com recurso a barras pré-fabricadas é feito pela técnica NSM, tal como descrito no reforço de vigas à flexão, com estas instaladas paralelamente ao eixo do pilar (Figura 4.5 a). No reforço com mantas e tecidos, estes devem ser aplicados com a direcção principal das fibras orientada paralelamente ao eixo do pilar.

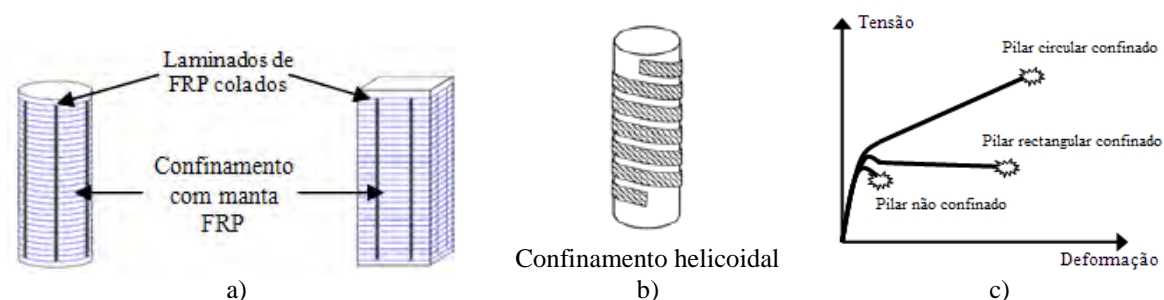


Figura 4.5: a) - Reforço de pilares à flexão e confinamento (adaptado de Juvandes e Costa, 2002); b) - Reforço de pilares ao corte (adaptado de Juvandes e Costa, 2002); c) - Comportamento de pilares confinados com secção rectangular, circular e não confinados (adaptado de ISIS, 2006c).

*Reforço ao corte* – O reforço de pilares ao corte é necessário quando estes são sujeitos a esforços cortantes para os quais não foram dimensionados ou quando há necessidades de resistir a acções sísmicas. O reforço ao corte pode ser feito com a aplicação de mantas ou tecidos de forma a confinar o pilar, ou ainda com laminados pré-fabricados, cuja aplicação é mais simples pois o laminado pré-fabricado em forma de “casca” é colado ao pilar, fazendo o confinamento. No caso das mantas, estas têm de ser aplicadas com a direcção das fibras perpendiculares ao eixo do pilar, enroladas no pilar de forma helicoidal, conforme mostra a Figura 4.5 b).

*Reforço à acção sísmica, à compressão, ao impacto e aumento de ductilidade* – O confinamento de pilares com coletes de FRP aumenta consideravelmente a sua resistência axial, ductilidade e resistência à deformação axial, uma vez que restringe a deformação transversal e, consequentemente, a encurvadura da armadura longitudinal, tal como se pode ver na Figura 4.5 c). Através do confinamento também é possível aumentar a resistência à compressão do betão, aumentar a resistência ao impacto, controlar a fendilhação do betão e a consequente corrosão das armaduras. O reforço de pilares pode ser feito basicamente de duas formas, através da utilização de mantas flexíveis ou laminados rígidos fabricados com o formato da secção transversal. No caso das mantas flexíveis de FRP, estas podem estar



dispostas nas direcções transversal e/ou longitudinal, consoante se queira reforçar o pilar ao corte e/ou confinar o pilar para aumento da resistência sísmica e axial, respectivamente. A aplicação das mantas pode ser feita de forma manual (*wet-lay-up systems*) ou pode ser aplicada por meios automáticos que enrolam as mantas no pilar, confinando-o. O reforço pode ainda ser feito com laminados rígidos pré-fabricado em forma de “casca” colados no pilar, fazendo o confinamento.

#### **4.4. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação às técnicas de reforço com FRP**

Após a análise da norma “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” da *fib*, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures” do ACI Committee 440, do módulo educacional “Introduction to FRP composites for construction” do ISIS-Canada e da “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures” do CNR podem-se fazer alguns comentários acerca da abordagem da mesmas em relação às técnicas de reforço com FRP.

A norma da *fib*, no capítulo 2, enumera e descreve detalhadamente os vários materiais e técnicas de reforço com FRP. Nos capítulos 4, 5 e 6 faz uma análise e descrição aprofundada da metodologia de cálculo e verificação, modos de rotura, comportamento e características de cada reforço, à flexão, corte e confinamento, respectivamente. Todas as recomendações necessárias à boa execução do reforço com sistemas FRP são tratadas no capítulo 7, bem como a pormenorização das disposições construtivas para cada tipo de reforço. No capítulo 8 são tratadas as metodologias e processos de execução prática dos reforços FRP abordados no capítulo 2.

A guideline ACI 440.2R-02, no capítulo 5, refere as questões relacionadas com a instalação dos produtos constituintes dos sistemas FRP, nomeadamente a forma como podem ser aplicados, os requisitos necessários, a ordem de aplicação, etc. No capítulo 9 é apresentada a metodologia de cálculo para o reforço de vigas e lajes à flexão aplicando sistemas EBR. São tratados os modos de rotura, ductilidade e as características dependentes do comportamento betão-FRP. No capítulo 10 é apresentada a metodologia de cálculo para o reforço de vigas ao corte aplicando sistemas EBR. Apresenta disposições

construtivas para a aplicação do reforço e, para cada disposição, indica a extensão admissível. No capítulo 11 é apresentada a metodologia de cálculo do reforço de pilares à compressão axial e aumento de ductilidade, por confinamento. A metodologia de cálculo apresentada refere-se aos pilares circulares e para os pilares rectangulares é apresentada a justificação e a condição que valida o cálculo do reforço a partir das secções circulares.

O módulo educacional canadiano, no módulo 2, enumera as várias aplicações dos FRP na engenharia civil, onde aborda a temática do reforço e reabilitação de estruturas de betão, madeira, alvenaria e estruturas metálicas fazendo uma breve descrição das principais formas de reforço e as resistências que são aumentadas. Quanto ao reforço sísmico apenas refere, de forma sintética, com que materiais é feito, que propriedades melhora e a que estruturas pode ser aplicado. No módulo 4, que é direccionado para o reforço de estruturas de betão com FRP, são abordadas as três aplicações de reforço mais comuns, reforço à flexão, corte e confinamento. Em relação ao reforço à flexão, as estruturas que aborda são as lajes e vigas onde, para estas, demonstra as metodologias de cálculo do reforço e os modos de rotura. Em relação ao sistema de reforço a aplicar não especifica nenhum em concreto, dizendo, apenas, que será feito pela técnica EBR. No reforço ao corte, a abordagem é centrada nas vigas, demonstrando a metodologia de cálculo do reforço e os modos de rotura. Para este reforço, também não especifica nenhum sistema em concreto, apenas refere que é feito pela técnica EBR, mas apresenta algumas disposições construtivas. Em relação aos pilares, foca o reforço ao corte e à flexão, nomeadamente por confinamento, demonstrando a metodologia de cálculo. São distinguidos os pilares circulares dos rectangulares devido à sua diferença de comportamento quando reforçados. Na parte final deste módulo é feita uma breve descrição da aplicação de elementos pré-esforçados no reforço de estruturas e da aplicação da técnica FRP-NSM em reforço de vigas. O módulo 6 descreve com algum detalhe os sistemas disponíveis e a forma como são aplicados.

O documento do CNR possui uma grande lacuna em relação às técnicas de aplicação do reforço. Nada é dito quanto às possíveis formas de aplicação do reforço EBR. No respeitante à aplicação das técnicas de reforço EBR aos diferentes tipos de elementos em termos de cálculo, o documento é bastante completo pois descreve o cálculo do reforço à flexão, ao corte, à torção, ao confinamento e ao reforço sísmico. Tal como nas outras

normas, o cálculo toma como exemplo as vigas e os pilares, embora neste documento se possa encontrar um capítulo dedicado a estruturas de alvenaria.

De uma forma geral, todos estes documentos abordam o reforço à flexão, ao corte, à torção e ao confinamento de uma forma genérica e não direccionada a cada elemento estrutural em concreto. É então necessário, para cada tipo de elemento estrutural a reforçar, fazer uma análise e verificar a forma como o cálculo do reforço deve ser feito, tentando, de alguma forma, evitar a simplificação dos exemplos de cálculo e expondo os passos a seguir no cálculo do reforço de elementos de betão armado mais complexos, como é o caso de estruturas hiperestáticas, lajes, pilares sujeitos a flexão composta, etc.

## Capítulo 5.

### Controlo de Qualidade

O desempenho e a durabilidade dos sistemas de reforço FRP por colagem externa (FRP-EBR) dependem muito da qualidade dos materiais usados e do cuidado tido por quem os aplica. O processo de instalação pode variar de sistema para sistema dependendo do tipo e das condições da estrutura e por isso, sistemas idênticos podem ter metodologias de aplicação diferentes. É muito importante quando se usam sistemas de reforço FRP o desenvolvimento e colocação em prática de processos de controlo e garantia de qualidade durante o processo de instalação. A Tabela 5.1 mostra uma *checklist* com as recomendações típicas de controlo e garantia de qualidade (ISIS, 2006e).

Tabela 5.1: *Checklist* básica para controlo e garantia de qualidade (adaptado de ISIS, 2006e).

<i>Checklist básica para controlo e garantia de qualidade</i>	
<input checked="" type="checkbox"/>	Materiais e sistemas FRP qualificados
<input checked="" type="checkbox"/>	Engenheiros, empreiteiros e inspectores devidamente formados e certificados na utilização de sistemas FRP
	Inspecções periódicas feitas por pessoas especializadas
	<i>Pré-instalação</i>
	-Betão;
	-FRP;
<input checked="" type="checkbox"/>	<i>Durante a instalação</i>
	-Quantidades de materiais usados;
	-Taxas de aplicação;
	-Condições ambientais;
	-Alinhamento das fibras;
	-Aprovação dos painéis;
	<i>Após a instalação</i>
	-Falhas e descolamentos;
	-Espessura do FRP curado;
	-Ensaio de colagem;
	-Ensaio de carga.

### 5.1. Qualificação dos materiais

Os adesivos e sistemas FRP-EBR usados devem ser caracterizados de acordo com métodos de teste standard. Os materiais FRP devem cumprir as qualificações em termos de

propriedades mecânicas, físicas e químicas exigidas pelo projecto. Embora muitos dos fornecedores de FRP's disponibilizem informação acerca das propriedades dos seus sistemas de reforço, normalmente são realizados testes de qualificação por uma autoridade competente independente para confirmar a validade das propriedades físicas e mecânicas disponibilizadas (*fib*, 2001; ISIS, 2006e). As qualificações podem incluir testes para verificar (ISIS, 2006e):

- a) Resistência à tracção e o módulo de elasticidade;
- b) Extensão na rotura;
- c) Temperatura de transição vítrea,  $T_g$ , da resina;
- d) Pot-life da resina;
- e) Resistência da aderência ao betão.

#### 5.1.1. Agente de colagem

Os agentes de colagem normalmente utilizados são constituídos por dois componentes, resina e endurecedor, e são do tipo epoxi ou idênticos. A grande experiência no uso de adesivos epoxi e a sua durabilidade, comprovam a sua aptidão. No entanto, podem ser usados outros adesivos desde que comprovem ter um desempenho e durabilidade equivalente. Os requisitos do adesivo para colagem estrutural são estabelecidos na pr EN 1504-4 (ACI 440.2R-02, 2002).

##### 5.1.1.1. Propriedades físicas

*Viscosidade e tixotropia* – o agente polimérico de colagem deve ser capaz de ser aplicado imediatamente após a mistura, de acordo com as instruções do fabricante, em camadas com a espessura mínima especificada e proporcionando um humedecimento correcto. A viscosidade do adesivo deve ser optimizada de acordo com a utilização pretendida e irá diferir para os sistemas FRP-EBR pré-fabricados e *wet-lay-up*. Esta pode ser determinada de acordo com a ISO 3219, CEN 1995. A tixotropia é necessária quando se requer uma alta viscosidade com capacidade de humedecimento durante o espalhamento. A aptidão do adesivo para aplicação em superfícies verticais, horizontais e inclinadas pode ser verificada pela EN 1799, CEN 1998 (*fib*, 2001).

*Condições de cura e retracção* – o adesivo deve ser capaz de curar com a resistência necessária mesmo sob condições extremas de temperatura e humidade, as quais devem ser

especificadas pelo fabricante. A temperatura máxima de cura pode ser especificada em relação ao *pot-life* e à viscosidade, e a temperatura mínima à qual a cura ainda é possível, geralmente, é igual a 5°C. A humidade relativa acima da qual ocorre insuficiência de adesão, geralmente, é de 80%. Durante a cura, o adesivo deve apresentar uma retracção inferior a 0,1%, determinada de acordo com a prEN 12617-3, CEN 2001 (*fib*, 2001).

*Pot-life, open-time e prazo de validade* – o adesivo depois de misturado deve ter um *pot-life* superior a 40 minutos à temperatura de aplicação e pode ser determinado de acordo com a prEN 14022, CEN 2001. O tempo após a aplicação do adesivo (*open-time*) dentro do qual a união pode ser efectuada, deve ser superior a 20 minutos à temperatura de aplicação e pode ser determinado de acordo com EN 12189, CEN 1999. O prazo de validade de todos os componentes do adesivo deve ser superior a 6 meses, quando em recipientes originais e armazenados entre 5 e 25°C. Se o prazo de validade, *pot-life* ou *open-time* tiverem sido ultrapassados, o adesivo não deve ser usado (*fib*, 2001).

*Temperatura de transição vítrea,  $T_g$*  – a temperatura de transição vítrea deve ser suficientemente grande em relação à temperatura de serviço,  $T_g \geq 45^\circ\text{C}$ , ou à temperatura máxima do ar em serviço  $+20^\circ\text{C}$ , consoante a que for maior. A temperatura de transição vítrea pode ser determinada de acordo com a prEN 12614, CEN 2001 (*fib*, 2001).

*Resistência à humidade* – o transporte de humidade através do adesivo deve ser minimizado. A absorção máxima após imersão em água, de acordo com prEN 13580, CEN 2001, não deve exceder 3% em peso (*fib*, 2001).

*Propriedades do puttie filler* – os *puttie fillers* usados em conjunto com os adesivos devem ser electricamente não condutores, altamente resistentes à humidade, capazes de resistir a temperaturas até 120°C, sem degradação e ter dimensões máximas das partículas de 0,5 mm (*fib*, 2001).

#### 5.1.1.2. Durabilidade e propriedades mecânicas do adesivo curado

*Módulo de elasticidade em flexão (módulo de flexão)* – o módulo de elasticidade deve ser determinado de acordo com a ISO 178, 1993 devendo estar entre 2000 e 150000 N/mm<sup>2</sup>. O limite inferior está relacionado com a limitação da fluência e o superior com a minimização da concentração de tensões (*fib*, 2001).

*Resistência ao corte* – o valor mínimo necessário é  $12 \text{ N/mm}^2$  a  $20^\circ\text{C}$ . A resistência ao corte é determinada de acordo com a EN 12188, CEN 1999 (*fib*, 2001).

*Resistência à adesão* – a resistência à adesão do agente de colagem é determinada de acordo com a EN 12188, CEN 1999 e deve ser superior a  $15 \text{ N/mm}^2$  a  $20^\circ\text{C}$  (*fib*, 2001).

*Resistência à compressão* – a resistência à compressão pode ser determinada de acordo com a EN 12190, CEN 1998 (*fib*, 2001).

A *durabilidade* deve ser comprovada com base em testes laboratoriais de durabilidade acelerada ou baseada em experiências a longo prazo (pelo menos 15 anos) em condições similares às de utilização. Quanto à durabilidade, fadiga e fluência sob ensaios de carga, é feita referência à prEN 13584-1, CEN 2001, prEN 13733, CEN 2001, prEN 13894-1, CEN 2001 e prEN 13894-2, CEN 2001 (*fib*, 2001).

#### 5.1.2. Sistema FRP-EBR

O sistema FRP-EBR é definido basicamente pelo(s) tipo(s) de fibra(s), pela resina de aglutinação (matriz) e pela direcção e fracção de volume das fibras.

##### 5.1.2.1. Tipo e características geométricas do FRP-EBR

O tipo de FRP-EBR e as características dimensionais devem ser especificadas em termos de: tipologia - *pré-fabricados* (tiras ou laminas) ou *curados in-situ* (mantas ou tecidos); tipo(s) de fibra(s); tipo de resina; direcção das fibras; largura, comprimento e espessura nominal.

A definição da espessura do FRP deve ser claramente indicada, sendo geralmente feita referência à espessura global ou à espessura das fibras secas (*fib*, 2001).

##### 5.1.2.2. Propriedades físicas do FRP-EBR

*Fracção de fibra* – o peso da fracção de fibra, a fracção do volume de fibra ou o peso de fibra por unidade de área deve ser apresentado para cada uma das direcções das fibras.

*Quantidade de resina para impregnação* – a quantidade mínima de resina por unidade de área, para impregnar as mantas ou tecidos curados *in-situ* deve ser conhecida.

*Coeficiente de expansão térmica* – o coeficiente de expansão térmica deve ser determinado de acordo com a EN 1770, CEN 1998.

*Temperatura de transição vítrea* – a temperatura de transição vítrea dos FRP's pré-fabricados normalmente é maior (devido ao processo de produção) do que a do agente de colagem. A temperatura de transição vítrea dos sistemas *wet-lay-up* é dada pela resina de colagem e impregnação.

*Absorção de humidade e estabilidade química* – tal como especificado para o agente de colagem, a absorção de humidade do FRP curado deve ser limitada. Embora os sistemas FRP-EBR geralmente tenham boa estabilidade química, a durabilidade do sistema nestes ambientes deve ser demonstrada (*fib*, 2001).

#### *5.1.2.3. Durabilidade e propriedades mecânicas do FRP*

*Resistência à tracção, módulo de elasticidade, tensão e extensão de rotura* – a extensão de tracção, o módulo de elasticidade na origem (módulo tangente), o módulo secante (dado por 20-60% da carga última) e a extensão de rotura devem ser determinados por ensaios de tensão. Não existem métodos padrão disponíveis, embora possa ser feita referência aos métodos de ensaio para materiais FRP utilizados em outros campos: ISO 527-5,1997; EN 2561, CEN 1996; ASTM D 3039/D3039M, 1995. Os resultados dos testes devem ser apresentados como valores médios e desvio padrão. Para a resistência à tracção e módulo de elasticidade deve estabelecer-se claramente o valor da espessura nominal tido em consideração. As propriedades obtidas nos testes de tracção estão relacionadas com a direcção das fibras, sendo que, para os tecidos de FRP com fibras em múltiplas direcções, as propriedades deverão ser determinadas para cada direcção das fibras (*fib*, 2001). Os FRP's devem ter resistência suficiente à humidade, aos produtos químicos e às radiações UV ou então deverão ser protegidos por camadas protectoras.

## **5.2. Qualificação do construtor/aplicador**

A instalação dos sistemas FRP requer muito cuidado, pelo que esta só deve ser feita por pessoal qualificado, treinado e com prática. O produtor do sistema FRP ou o agente autorizado deve formar e informar o pessoal das empresas que adquirem os seus sistemas FRP acerca dos procedimentos de aplicação dos mesmos. O construtor responsável pela



instalação do sistema deve demonstrar competência para a preparação de superfícies e para a aplicação do sistema FRP. A competência do construtor deve ser demonstrada pela prova de formação e documentação relacionada com trabalhos previamente executados ou pelo trabalho actual desenvolvido na preparação da superfície e aplicação do sistema FRP em zonas localizadas da estrutura (ACI 440.2R-02, 2002).

### **5.3. Inspecção e controlo de qualidade *in-situ***

As inspecções devem ser realizadas antes, durante e após a instalação dos materiais FRP de forma a garantir que o reforço da estrutura seja feito conforme o desejado, devendo as inspecções ser conduzidas por um engenheiro treinado e certificado. As inspecções devem avaliar a presença e a extensão de delaminações, a adequação da cura da resina, a adesão, a espessura do FRP, o alinhamento das fibras, as propriedades da colagem e as propriedades dos materiais existentes (ISIS, 2006e).

#### *5.3.1. Inspecção pré-instalação*

A superfície de betão deve ser inspeccionada no que diz respeito à solidez e à preparação adequada da mesma. Esta inspecção deve incluir a examinação da rugosidade das superfícies, a existência de buracos, fissuras, saliências, ângulos afiados e outras imperfeições.

Os materiais FRP devem ser inspeccionados para assegurar que apresentam as características físicas e mecânicas exigidas pelo projecto (ISIS, 2006e).

#### *5.3.2. Inspecção durante a instalação*

Durante a instalação é importante ter o cuidado de acompanhar e controlar atentamente as quantidades de material a ser usadas de forma a assegurar a utilização de *primers*, *putties* e saturantes nas proporções correctas. Os tempos de mistura e instalação, as temperaturas e a humidade relativa devem ser controlados e registados ao longo do processo de instalação, bem como, a verificação do alinhamento e direcção das fibras.

Devem ser recolhidas amostras ao longo da aplicação dos sistemas de reforço, das várias resinas e dos sistemas FRP's, podendo ser testados posteriormente a fim de verificar e comprovar as suas propriedades (ISIS, 2006e).

Os registos das inspecções diárias devem conter (ACI 440.2R-02, 2002; Petersen e Poulsen, 2001):

- a) Data e hora de instalação;
- b) Temperatura ambiente, humidade relativa e condições meteorológicas no geral;
- c) Temperatura superficial do betão;
- d) Secura da superfície;
- e) Métodos de preparação e rugosidade da superfície;
- f) Descrição qualitativa da preparação e limpeza da superfície;
- g) Tipo de elementos auxiliares de controlo ambiental, se for o caso;
- h) Largura das fendas não reparadas pela aplicação/injecção de epoxi;
- i) Registo detalhado do número dos lotes dos materiais FRP e localização da zona da sua aplicação na estrutura;
- j) Número dos lotes, rácios de mistura, tempos e métodos de mistura, descrição da aparência de todas as resinas misturadas (*primers*, *putties*, saturantes, adesivos e acabamentos);
- k) Observações sobre a cura das resinas;
- l) Orientação das fibras antes de instaladas;
- m) Conformidade com os procedimentos recomendados para a instalação;
- n) Resultado dos ensaios de tracção em painéis testemunha, quando necessário;
- o) Resultado dos levantamentos de delaminações e testes de *pull-off*;
- p) Andamento geral dos trabalhos.

### 5.3.3. Inspecção após a instalação

Após a instalação dos sistemas de reforço FRP-EBR devem ser efectuados vários testes para garantir que estes foram correctamente instalados e que serão capazes de executar a longo prazo a função para a qual foram concebidos. Os testes de controlo de qualidade mais comuns são descritos em seguida.

#### 5.3.3.1. Inspecção de vazios e delaminações

Após a resina começar a endurecer (geralmente dentro das primeiras 24 horas após a aplicação), deve ser feita uma inspecção visual e acústica (por exemplo, com um martelo, Figura 5.1) ao FRP colado, a fim de identificar áreas descoladas, bolsas de ar e vazios

debaixo do FRP. Podem ser usadas outras técnicas de inspecção não destrutivas, tais como inspecção ultra sónica e termografia, que permitem determinar imperfeições, vazios, bolsas de ar e delaminações (ISIS, 2006e).

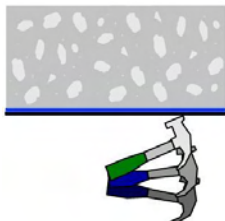


Figura 5.1: Inspeção acústica com martelo (adaptado de ISIS, 2006e).

Os vazios e/ou delaminações detectados após a instalação e cura do sistema FRP devem ser reparados. A técnica de reparação a usar depende do tamanho e da localização das delaminações e dos seus efeitos no comportamento estrutural do sistema FRP. Consoante a dimensão das delaminações, diferentes considerações devem ser adoptadas (ISIS, 2006e):

*Área de delaminação  $< 1300 \text{ mm}^2$*  – são consideradas pequenas delaminações e, na maioria dos casos, não requer correcção desde que a área de delaminação seja inferior a 5% da área total colada e desde que não hajam mais de 10 delaminações por metro quadrado.

*Área de delaminação  $> 16000 \text{ mm}^2$*  – são consideradas grandes delaminações e devem ser reparadas fazendo o corte selectivo da área afectada seguido de posterior aplicação de “primer”, massa de nivelamento e aplicação de uma manta de FRP equivalente à removida, de modo a fazer um remendo.

*Área de delaminação entre 1300 e 16000  $\text{mm}^2$*  – são consideradas delaminações moderadas e podem ser reparadas por injeção de resina saturante a baixa pressão nos vazios das delaminações ou reparadas pelo método usado para as grandes delaminações.

#### 5.3.3.2. Espessura do FRP curado

Podem ser recolhidas pequenas amostras do sistema FRP instalado, retiradas de zonas não críticas para avaliar a espessura do sistema de reforço curado. As áreas de onde se recolheram as amostras devem ser reparadas com um remendo (ISIS, 2006e).

#### 5.3.3.3. Teste de aderência

Em aplicações mais importantes ou onde a aderência é factor importante, é comum a realização de ensaios de aplicação directa de tensões no sistema FRP instalado, segundo os métodos de ensaio referidos na ACI 440.3R-04 ( 2004). Um dos testes muito utilizado é o *pull-off test* (Figura 5.2) que é realizado segundo a EN 1542, CEN1999 (ACI 440.2R-02, 2002). Estes testes devem ser realizados em adesivos com, pelo menos, 24 horas de cura. O modo de rotura preferido nestes testes é a ocorrência de rotura coesiva no betão para uma resistência mínima à tracção no substrato de 1,4 a 1,5 MPa (ISIS, 2006e).

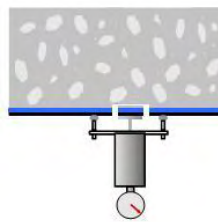


Figura 5.2: Ensaio *pull-off* (adaptado de ISIS, 2006e).

#### 5.3.3.4. Teste de carga

Em alguns casos, as estruturas reforçadas com sistemas FRP podem ser sujeitas a ensaios de carga para verificar o desempenho do sistema de reforço em serviço. Sempre que seja necessário efectuar ensaios de carga, deve ser consultado um engenheiro experiente o qual deve ser o responsável pela execução dos testes. O engenheiro deve fornecer um relatório escrito sobre todos os aspectos relativos ao controlo e garantia de qualidade, testes e resultados.

### 5.4. Comentário sobre a abordagem das diferentes normas em relação ao controlo de qualidade

Após a análise da norma “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” da *fib*, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures” do ACI Committee 440, do módulo educacional “Introduction to FRP composites for construction” do ISIS-Canada e da “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures” do CNR podem-se fazer alguns comentários acerca da abordagem da mesmas em relação ao controlo de qualidade.

Dos documentos analisados, o que melhor aborda a questão do controlo de qualidade é a norma elaborada pela *fib*. Esta norma dedica um capítulo, o capítulo 8, à execução prática e controlo de qualidade dos sistemas FRP. Especifica os procedimentos recomendados desde a execução prática dos processos de reparação, preparação das superfícies de betão, preparação e aplicação dos sistemas FRP-EBR até ao acabamento final.

Em relação ao controlo e garantia de qualidade, aborda a forma como este controlo é feito, desde os materiais, construtor/aplicador até as fases antes, durante e após a aplicação dos sistemas. Para a caracterização e controlo de qualidade dos materiais, refere as propriedades geométricas, físicas, mecânicas e durabilidade exigidas, bem como as normas que as estabelecem. Para o controlo de qualidade *in-situ*, antes e durante a execução prática, esta norma identifica quais os aspectos que devem ser avaliados e controlados pelo engenheiro desde o controlo dos materiais quando chegam à obra até ao controlo das condições e processos de aplicação. Em relação ao controlo de qualidade após a execução, a norma refere algumas técnicas não destrutivas e parcialmente destrutivas que permitem diagnosticar a presença de vazios, delaminações, bolsas de ar, etc. Em relação à reparação destas imperfeições, é feita uma simples descrição da forma como pode ser feita.

A norma do ACI, subdivide a questão do controlo de qualidade em vários capítulos. No capítulo 4 são tratadas as questões relativas ao manuseamento, transporte e armazenamento dos produtos e dos sistemas FRP. Aqui é descrita de forma sintética e, por vezes um pouco omissa, os cuidados de segurança a ter e os procedimentos correctos para cada etapa, manuseamento, transporte e armazenamento.

No capítulo 5 são tratadas, de forma simples e clara, as questões relacionadas com a instalação dos sistemas. Desde a qualificação e competência do construtor, equipamentos usados até à preparação do substrato, aplicação e cura dos sistemas, é feita uma descrição bastante objectiva dos requisitos exigidos, valores exigidos para algumas características, e formas óptimas de execução.

O capítulo 6 é estritamente ligado às questões do controlo de qualidade *in-situ*, onde é descrito de forma clara e objectiva quais os aspectos relevantes no processo de controlo de qualidade e indica as normas aplicáveis que estabelecem os valores, as características exigidas e os métodos de ensaio. Relativamente à inspecção *in-situ*, é apresentada uma lista de pontos que devem ser verificados e registados no decorrer da obra. Quanto à avaliação e

aceitação dos materiais a norma é bastante clara, fazendo uma descrição das características e requisitos que os materiais devem satisfazer, referenciando normas para o seu ensaio. Na avaliação e aceitação dos trabalhos, a norma estipula limites para as imperfeições, para as características da cura da resina, adesão ao betão e espessura final do sistema. São referidas normas e ensaios normalizados que permitem fazer esta avaliação.

O módulo educacional 6 do ISIS-Canada, tal como a ACI 440.2R-02, trata as questões relativas ao manuseamento, transporte e armazenamento dos produtos constituintes dos sistemas FRP, sendo também os varões FRP tema discutido.

Relativamente aos processos de instalação dos sistemas FRP-EBR, é feita uma descrição objectiva da forma como este é feito e de quais os equipamentos que são utilizados.

Em relação ao controlo e garantia de qualidade, o módulo educacional 6 faz uma descrição clara da forma como se processa e quais os aspectos relevantes a ter em conta durante o processo de controlo de qualidade antes, durante e após a execução da aplicação dos sistemas FRP. No entanto, não é feita nenhuma referência a normas que regulem os ensaios que permitem avaliar a qualidade dos materiais e sistemas aplicados, embora sejam indicadas as características e os valores exigidos.

No documento proposto pelo CNR o controlo de qualidade é abordado já na fase de produção do FRP. Refere que devem ser cumpridos dois níveis de qualidade dos sistemas FRP, o nível 1 – onde são definidas estatisticamente as propriedades físicas e mecânicas e o nível 2 – onde são definidas as propriedades físicas e mecânicas a longo prazo. Para cada um destes níveis é apresentada uma lista exaustiva de normas aplicáveis a cada propriedade das fibras. Ainda no capítulo 2 são dadas indicações e recomendações que os instaladores devem cumprir e ter em atenção, bem como os cuidados a ter no transporte armazenamento e manuseamento dos sistemas e produtos FRP.

Já noutro capítulo, uma simples abordagem é feita às condições de instalação, monitorização e controlo de qualidade durante e após aplicação do reforço.

Destes quatro documentos analisados, pode-se concluir que a norma da *fib* é que melhor aborda as questões relativas ao controlo e garantia de qualidade, no entanto considera-se que, tanto o módulo educacional canadiano como a guideline do ACI também são bons documentos a seguir, embora não sejam tão específicos.

Existe uma outra norma de ensaios, ACI 440K, do ACI Committee 440 (ACI 440K, 2001), que apresenta modelos de métodos de ensaio para determinar as propriedades mecânicas a curto prazo e a longo prazo, determinar propriedades termo-mecânicas e ensaios de durabilidade de varões e mantas/tecidos FRP. É possível aplicar esta norma para determinar as características e propriedades dos produtos e sistemas e assim conseguir saber se apresentam os requisitos necessários ao desempenho da sua função e qualidade.

## Capítulo 6.

### Análise e aplicação das normas

#### 6.1. Descrição geral das normas

De forma a perceber melhor as metodologias de cálculo propostas pelos documentos da *fib*, do ACI e do CNR, optou-se por aplicá-las a elementos teóricos, permitindo assim uma análise mais concreta. Estes elementos são uma viga com necessidades de reforço ao corte e flexão e um pilar com necessidades de reforço induzidas pelo efeito sísmico.

Para cada necessidade de reforço serão aplicadas e avaliadas as metodologias de cada documento, permitindo assim identificar possíveis lacunas ou insuficiências dos mesmos. Será também possível comparar os resultados obtidos segundo os documentos.

##### *Documento da fib (fib, 2001)*

A norma elaborada pela *fib* está dividida em 9 capítulos e 3 anexos.

No primeiro capítulo é feita uma pequena resenha sobre a técnica de reforço EBR e suas aplicações, é feita a distinção entre os conceitos de reparação, reforço e reconstrução e são ainda apresentados os conteúdos e objectivos do documento. Note-se que este documento é direccionado para a reparação e reforço de estruturas de betão armado, empregando sistemas FRP pela técnica EBR, pelo que todas as bases de cálculo e conceitos de segurança nele presentes não se aplicam a outras técnicas de reforço.

No segundo capítulo é feita uma breve síntese dos materiais constituintes dos sistemas de reforço FRP, dos tipos de sistemas FRP-EBR e das técnicas básicas e especiais de reforço. O terceiro capítulo é dedicado às bases de cálculo e conceitos de segurança, onde são definidos os limites de cálculo e verificação aos estados limites, bem como, os modelos dos materiais FRP e os coeficientes de segurança parciais a aplicar. O quarto capítulo é integralmente dedicado ao reforço à flexão, sendo apresentados os possíveis modos de



rotura, as metodologias de cálculo e as verificações aos estados limites. Complementarmente a este capítulo encontram-se três anexos que contêm indicações sobre algumas verificações de segurança ao nível do reforço. No quinto capítulo são tratados o reforço ao corte e à torção. O confinamento é tratado no capítulo 6, mais propriamente o confinamento de colunas. Ao longo dos capítulos sétimo, oitavo e nono são apresentados os detalhes e pormenores das técnicas de reforço, são expostas as técnicas de execução do reforço e seu controlo de qualidade, bem como, as considerações a tomar no cálculo e execução do reforço devido aos efeitos ambientais.

Este documento é apenas uma proposta normativa que apresenta várias expressões e procedimentos que precisam de ser revistos, necessitando assim de maior comprovação prática. Note-se que, até à data, este é o documento com propostas de dimensionamento mais abrangentes, alertando o projectista para uma série de verificações de segurança, que não são mencionadas noutras propostas e que não deveriam ser ignoradas (Azevedo, 2008).

#### *Documento do ACI (ACI 440.2R-02, 2002)*

O documento apresentado pelo ACI é uma guideline que se encontra dividida em 5 partes materializadas em 15 capítulos e 3 anexos.

Na primeira parte deste documento é feito um breve apanhado histórico sobre o uso dos FRP, são apresentadas as formas comerciais mais correntes de reforço por colagem exterior e são também apresentadas as definições e notações usadas ao longo de todo o documento. Na segunda parte apresentam-se as propriedades físicas e mecânicas dos materiais integrantes dos sistemas FRP, bem como informação acerca da durabilidade e comportamento a longo prazo. A terceira parte aborda as recomendações a seguir no manuseamento, armazenamento, transporte e aplicação dos produtos e sistemas FRP, bem como as práticas para a inspecção e manutenção dos mesmos. Na quarta parte, são delineadas e apresentadas as recomendações para dimensionamento do reforço à flexão, ao corte, compressão axial e aumento de ductilidade de elementos de betão armado. Nesta parte são também apresentadas disposições construtivas, detalhes de execução do reforço e especificações para projecto. Por fim, na quinta parte são apresentados exemplos de cálculo de reforço FRP.

### *Documento do CNR (CNR, 2004)*

Estruturalmente, o documento proposto pelo CNR encontra-se organizado em 5 capítulos e 5 anexos.

As definições e notações empregues ao longo de todo o documento encontram-se no primeiro capítulo. O segundo capítulo apresenta as características físicas e mecânicas dos compósitos e dos seus constituintes, e caracteriza os sistemas de reforço FRP existentes. Neste capítulo, são ainda abordadas as recomendações a seguir no manuseamento, armazenamento, transporte e aplicação dos produtos e sistemas FRP, bem como as práticas para o controlo de qualidade e aceitação dos mesmos. No terceiro capítulo são apresentados os conceitos relativos aos requisitos básicos, requisitos de durabilidade e princípios básicos de cálculo. Neste capítulo encontram-se também os coeficientes parciais de segurança, bem como os coeficientes relativos aos efeitos ambientais e ao fogo. No quarto capítulo são delineadas e apresentadas as recomendações para dimensionamento do reforço à flexão, ao corte, à torção e à compressão axial de elementos de betão armado. Neste capítulo também são apresentados os conceitos necessários para o cálculo de reforço destinado a aplicações sísmicas e são apresentados todos os passos a seguir na instalação, monitorização e controlo de qualidade dos sistemas FRP. O quinto capítulo é direccionado para o reforço de estruturas de alvenaria. Ao longo dos anexos de A a D encontram-se expostos os pormenores e definições relativos às técnicas de manufacção, rotura por descolamento e reforço de elementos sujeitos a momento e esforço axial. Por fim, no anexo E são apresentados exemplos de cálculo de reforço FRP.

## **6.2. Apresentação do modelo teórico da viga para reforço à flexão e ao corte**

As metodologias de cálculo do reforço contempladas por cada norma em análise foram aplicadas a um modelo teórico de viga.

Como pressupostos para o cálculo da viga, considerou-se que esta pertencia a um edifício de habitação, o qual posteriormente irá ser transformado num edifício comercial, passando a sobrecarga de utilização para um valor quatro vezes superior. Este edifício é constituído por uma estrutura reticulada de vigas e pilares, onde as lajes são unidireccionais, pré-fabricadas de vigotas e abobadilha.

As cargas consideradas para o dimensionamento da laje aligeirada foram de  $1,00 \text{ kN/m}^2$  para os revestimentos,  $1,50 \text{ kN/m}^2$  para as paredes divisórias e  $2,00 \text{ kN/m}^2$  para a sobrecarga. A solução de laje adoptada para os 5 m de vão e para as cargas a que está sujeita, possui uma espessura de 0,20 m sendo o seu peso próprio de  $3,15 \text{ kN/m}^2$ .

Os pressupostos base para o pré-dimensionamento e dimensionamento da viga foram:

- a) Viga simplesmente apoiada de 5 m de vão;
- b) Betão da classe C20/25;
- c) Aço da classe A400;
- d) Largura de influência da viga de 5 m;
- e) Área de influencia da viga  $25 \text{ m}^2$ .

Do pré-dimensionamento da viga resultou uma secção de 0,3 x 0,6 m.

Dos pressupostos acima indicados e das cargas adoptadas para o dimensionamento (ver Tabela 6.1) resultou uma viga com uma secção de 0,3 x 0,6 m, com armadura inferior de  $4\phi 20$  a meio vão, dispensando  $2\phi 20$  a 0,80 m das extremidades, e com armadura superior de  $2\phi 12$ . A armadura transversal é constituída por estribos de dois ramos em  $\phi 6$  espaçados a 0,150 m ao longo de 1,50 m medidos a partir das extremidades da viga e estribos de dois ramos em  $\phi 6$  espaçados a 0,200 m nas restantes zonas.

Tabela 6.1: Cargas actuates na viga; Carga de dimensionamento.

<b>Cargas permanentes – G</b>		<b>kN/m</b>
Peso próprio da viga		4,50
Peso próprio da laje		15,75
Revestimentos		5,00
Paredes divisórias		7,50
<b>Cargas variáveis – Q</b>		
Sobrecarga		10,00

A viga teórica cumpre todos os limites impostos pelo EC2 no que respeita a estados limites últimos (ULS) e estados limites de utilização (SLS),

<i>Limitação das tensões</i>	Combinações Quase Permanentes	$\rightarrow \sigma_{cc} < 0,45 f_{ck}$
	Combinações Raras	$\rightarrow \begin{cases} \sigma_{cc} < 0,60 f_{ck} \\ \sigma_{st} < 0,80 f_{yk} \end{cases}$
<i>Controlo da fendilhação</i>	Combinações Quase Permanentes	$\rightarrow W_k < W_{máx} = 0,3 \text{ mm}$
<i>Controlo da deformação</i>	Combinações Quase Permanentes	$\rightarrow \alpha < \alpha_{máx} = L/250$

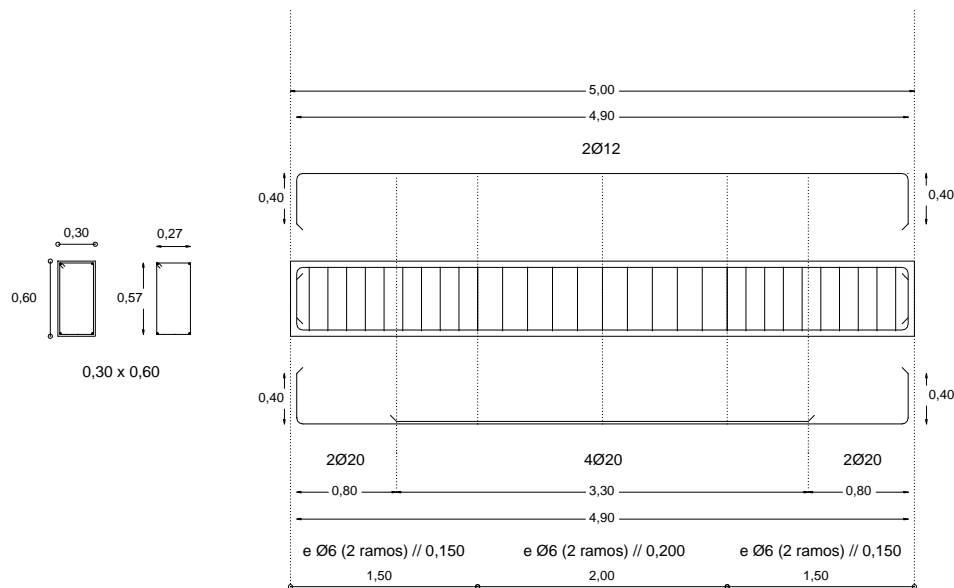


Figura 6.1: Desenho de pormenor das armaduras da viga.

### 6.3. Reforço à flexão

A necessidade de reforço à flexão da viga teórica surgiu devido à transformação do edifício onde esta se insere, a qual implicou um aumento da sobrecarga de utilização na ordem das quatro vezes a sobrecarga inicial, resultando em 40 kN/m.

O reforço à flexão foi feito com laminados de carbono (CFRP), tendo sido adoptado o mesmo tipo de laminado para os três documentos em análise.

#### *Princípios básicos*

O dimensionamento do reforço só é possível quando as propriedades dos sistemas e respectivos materiais, bem como os coeficientes de segurança correspondentes, estiverem definidos. A menos que todas as cargas actuantes num elemento, incluindo o peso próprio e cargas pré-esforço, sejam removidas antes da instalação do reforço FRP, existem extensões na face onde este vai ser instalado. Estas extensões, chamadas extensões iniciais, não devem ser contabilizadas para as extensões no reforço FRP.

De acordo com Silva, (2008), a segurança dos elementos reforçados pela técnica EBR deve ser verificada, entre outros, para os Estados Limites Últimos (ULS) de:

- Resistência* – insuficiência de capacidade resistente de uma ou várias secções críticas, quer por rotura, quer por deformação plástica excessiva. É estudado ao nível de secção do elemento reforçado;

- b) *Fadiga* – rotura de um ou mais materiais do elemento reforçado por efeito de fadiga, após a acção de cargas cíclicas. É estudado ao nível da secção do elemento reforçado;
- c) *Aderência* – rotura da ligação por aderência entre armaduras (ordinárias e/ou compósitos) e o betão. É estudado ao nível da secção do elemento reforçado;
- d) *Amarração* – rotura da ligação de extremidade entre as armaduras (ordinárias e/ou compósitos) e o betão e/ou em dispositivos de amarração. É estudado ao nível da zona local de amarração.

Ainda de acordo com Silva, (2008) a verificação destes mesmos elementos em Estados Limites de Serviço (SLS) é feita controlando os seguintes parâmetros:

- a) *Deformação* – valores máximos de flechas e rotações no elemento reforçado. É estudada ao nível da estrutura ou do elemento reforçado;
- b) *Fendilhação* – ocorrência e largura máxima de fendas no elemento reforçado. É estudado ao nível da secção do elemento reforçado;
- c) *Limitação* das tensões de compressão no betão (de modo a prevenir a fendilhação longitudinal e a deformação excessiva por fluência), das tensões de tracção nas armaduras ordinárias (de forma a evitar a sua plastificação) e das tensões de tracção no compósito (para evitar a deformação excessiva ou mesmo a rotura por fluência do compósito).

Ainda para a verificação aos SLS, deve ser admitido que os materiais têm um comportamento linear elástico, quer para a análise em secção fendilhada (onde é desprezada a contribuição do betão à tracção) quer para análise em secção não fendilhada.

Segundo Silva, (2008) o cálculo do reforço segue as premissas:

- a) Hipótese de Bernoulli – as secções planas antes da deformação mantêm-se planas após deformação;
- b) Equilíbrio de forças na secção;
- c) Perfeita compatibilidade de deformações entre materiais;
- d) Resistência do betão à tracção desprezável;
- e) Comportamento linear elástico do FRP até à rotura.

### 6.3.1. Condição de reforço máximo

De forma a prevenir o colapso da estrutura após a ruína do sistema de FRP devido a actos de vandalismo, impacto, fogo ou outras causas, devem ser definidos limites de reforço. Vários autores e fornecedores de sistemas de reforço FRP têm recomendado que se assegure que a estrutura, após uma eventual perda do reforço, resista no mínimo às acções permanentes e de sobrecarga não majoradas (valores característicos). Segundo Azevedo, (2008) uma das recomendações existentes estabelece que o aumento de resistência à flexão de elementos de betão, por colagem exterior de sistemas compósitos de FRP, não deve exceder o dobro da resistência do elemento não reforçado. O grau de reforço é definido através do parâmetro  $R$  dado por,

$$R = \frac{M_{sdf}}{M_{rd0}} \leq 2 \quad (6.1)$$

Onde,  $M_{sdf}$  é o valor de cálculo do momento flector actuante na secção critica em ULS, respeitando as combinações de acções definidas no EC2; e  $M_{rd0}$  é o valor de cálculo do momento flector resistente do elemento não reforçado.

O valor obtido para o parâmetro  $R$  permite concluir sobre a necessidade e sobre a possibilidade de reforçar. Se  $R \leq 1$ , não é necessário reforçar à flexão, pois o elemento estrutural ainda possui capacidade resistente para suportar as novas cargas. Se  $1 \leq R \leq 2$ , o reforço é necessário e viável, uma vez que respeita o limite de segurança de não reforçar acima do dobre da capacidade resistente do elemento estrutural original. Para valores de  $R \geq 2$ , ultrapassa-se o limite de segurança e, por isso, esta intervenção deixa de ser viável (Azevedo, 2008).

### 6.3.2. Documento da fib (fib, 2001)

#### 6.3.2.1. Bases de cálculo

A norma recomenda que, o estado de toda e qualquer estrutura que irá ser sujeita a reforço, seja conhecido e avaliado através de inspecções, análise dos documentos existentes e análises estruturais, bem como análise e verificação do estado dos elementos existentes.

Tal como nas estruturas novas de betão armado, a metodologia de cálculo de reforço de estruturas com FRP tem de verificar os estados limites de serviço (*SLS – Serviceability Limit State*) (limitação de tensões, limitação de deformações e controlo de fendilhação),

bem como o estado limite último (*ULS – Ultimate Limit State*). Em alguns casos o cálculo é condicionado pelos estados SLS, nomeadamente quando o reforço se prende com o objectivo de aumentar a resistência do elemento em serviço, tal como acontece neste trabalho.

### Acções

Segundo a norma, as acções e combinações de acções utilizadas no processo de cálculo e verificação aos SLS e ULS são as adoptadas pelo EC1. Os factores de segurança a adoptar para os materiais, betão e aço, na verificação ao ULS são os especificados no EC2.

### Materiais

Para a verificação ao estado SLS são utilizados valores característicos para as propriedades mecânicas do FRP.

A lei de comportamento à tracção do FRP proposta pela norma segue uma lei de tensão-extensão linear dada pela equação,

$$\sigma_f = E_{fk} \varepsilon_f \quad (6.2)$$

Onde,  $\sigma_f$  é o valor da tensão de tracção no FRP;  $E_{fk}$  o valor característico do módulo de elasticidade do FRP; e  $\varepsilon_f$  o valor da extensão do FRP.

Em relação à verificação ao estado ULS, a lei constitutiva do FRP adoptada continua a ser linear mas passa a ser dada por,

$$\sigma_f = E_{fu} \varepsilon_f \leq f_{fd} \quad (6.3)$$

Onde  $E_{fu}$  é o módulo de elasticidade último que se obtém do quociente,

$$E_{fu} = \frac{f_{fk}}{\varepsilon_{fuk}} \quad (6.4)$$

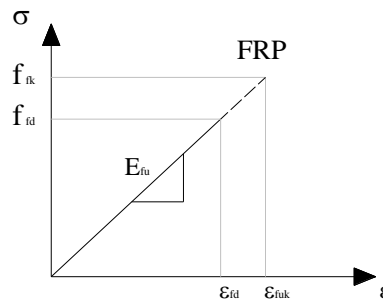


Figura 6.2: Lei de comportamento tensão-extensão do material FRP.

Na equação (6.4),  $f_{fk}$  é o valor característico da resistência; e  $\varepsilon_{fuk}$  o valor característico da extensão de rotura do FRP, pertencendo ambos os parâmetros ao percentil 5%.

O valor de cálculo da resistência à tracção do FRP, que limita a equação (6.3), pode ser obtido pela relação,

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (6.5)$$

Sendo  $\gamma_f$  o coeficiente de segurança do material FRP, dado na Tabela 6.2. No respeitante aos coeficientes de segurança a aplicar ao FRP, são sugeridos por este documento valores que são influenciados pelo método de aplicação e pelo tipo de fibra usada no sistema. No entanto, outros valores podem ser adoptados, já que, como refere a norma, a falta de dados e estudos a este respeito levam a que esta questão deva ser estudada com mais detalhe.

Tabela 6.2: Coeficiente de segurança dos materiais FRP,  $\gamma_f$  (adaptado de *fib*, 2001).

Tipo de Fibra	Tipo de sistema FRP	
	Pré-fabricados	Curados <i>in-situ</i>
CFRP	1,20	1,35
AFRP	1,25	1,45
GFRP	1,30	1,50

Conhecido o valor de resistência à tracção do FRP é possível determinar a extensão de cálculo do FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , pelo quociente,

$$\varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_{fu}} \quad (6.6)$$

#### 6.3.2.2. Estado inicial

Para proceder ao dimensionamento do reforço FRP é necessário perceber o estado do elemento a reforçar e conhecer a carga no elemento antes do reforço, bem como as extensões e deformações existentes provocadas por esta mesma carga. Estas extensões iniciais devem ser excluídas da extensão no reforço FRP uma vez que a deformação no FRP,  $\varepsilon_f$ , é diferente da do substrato de betão onde este vai ser aplicado. Assim, com base na teoria da elasticidade e com o momento em serviço (resultante das cargas sem coeficientes de segurança),  $M_0$ , actuante na viga é possível obter a distribuição de extensões na secção crítica. Normalmente o cálculo é feito para secção fendilhada devido a  $M_0$  ser maior que o momento de fendilhação,  $M_{cr}$ .



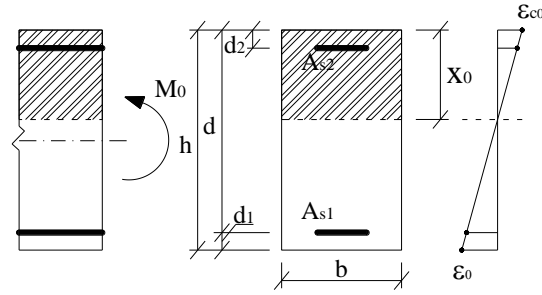


Figura 6.3: Distribuição de tensões e deformações numa secção de betão armado (adaptado de fib, 2001).

Com base no equilíbrio da secção homogeneizada do elemento e igualando o momento estático superior ao inferior, é possível determinar a posição do eixo neutro,  $x_0$ ,

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_0) \quad (6.7)$$

Onde,

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad (6.8)$$

A extensão no betão,  $\varepsilon_{co}$ , na fibra mais afastada da região em compressão é dada por,

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_{02}} \quad (6.9)$$

Vindo o momento de inércia da secção homogeneizada fendilhada,

$$I_{02} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2 \quad (6.10)$$

#### 6.3.2.3. Estados limites últimos (ULS)

A verificação aos ULS preconizada no documento em análise encontra-se dividida em função dos modos de ruína passíveis de ocorrer. Estes modos encontram-se divididos em duas classes: perda de ligação entre o compósito e o betão; e ligação perfeita entre o compósito e o betão.

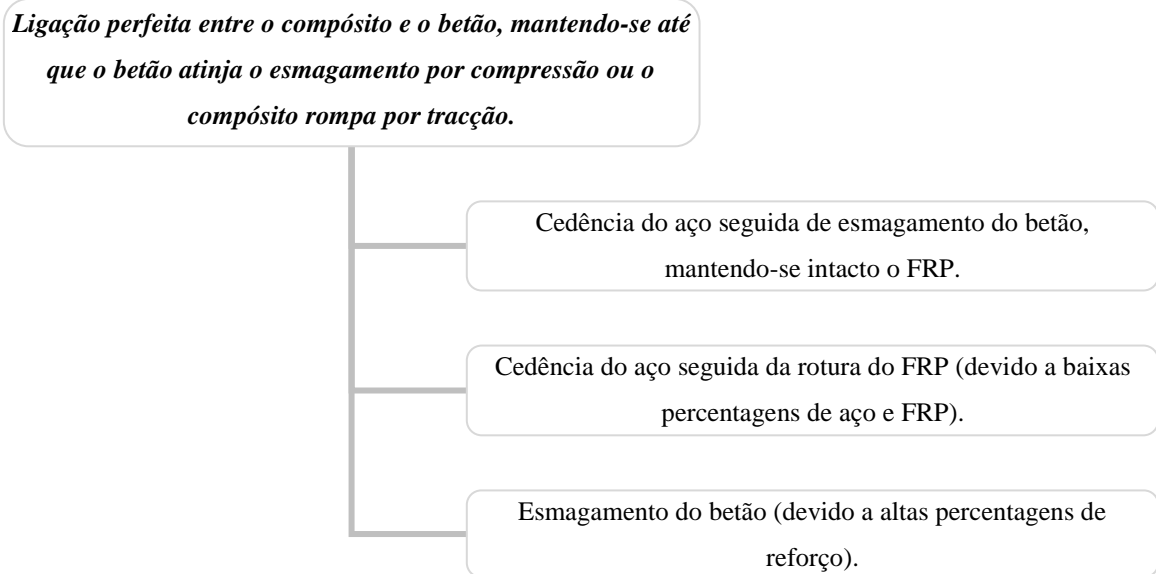


Figura 6.4: Ligação perfeita entre o compósito e o betão.

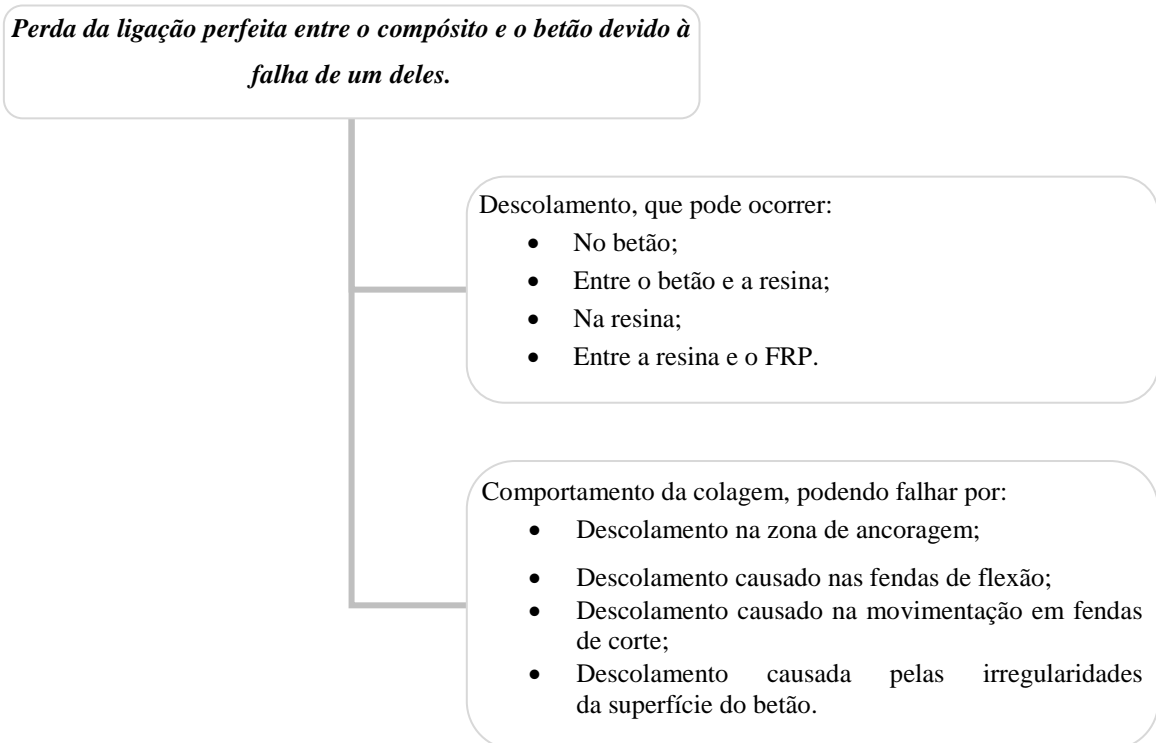


Figura 6.5: Perda de ligação entre o compósito e o betão.

### *Hipótese de ligação perfeita betão-compósito*

Como primeira análise consideram-se os modos de rotura em que é válida a hipótese de ligação perfeita entre o compósito e o betão determinando-se a área necessária de FRP que verifica o critério de segurança,

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \quad (6.11)$$

Onde,  $M_{Rd}$  representa o valor de cálculo do momento flector resistente e  $M_{Sd}$  representa o valor de cálculo do momento flector actuante. O valor do momento flector resistente está condicionado pela máxima deformação de cada material (betão, aço e FRP). A resistência da secção considera-se esgotada quando um dos materiais atinge a sua deformação máxima.

Para cada modo de rotura existe uma extensão limite máxima no compósito. Assim, para o modo de rotura que ocorre por cedência do aço seguida de esmagamento do betão mantendo-se intacto o FRP, a posição do eixo neutro é obtida do equilíbrio de extensões e forças internas na secção,

$$0,85\psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_f\varepsilon_f \quad (6.12)$$

Onde,  $\psi = 0,8$  e as extensões na armadura superior e no FRP valem, respectivamente,

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x} \quad (6.13)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad (6.14)$$

Note-se que na equação (6.12),  $E_s\varepsilon_{s2}$  não deve exceder  $f_{yd}$  e nas equações (6.13) e (6.14) é imposto  $\varepsilon_{cu} = 3,5 \text{ ‰}$ .

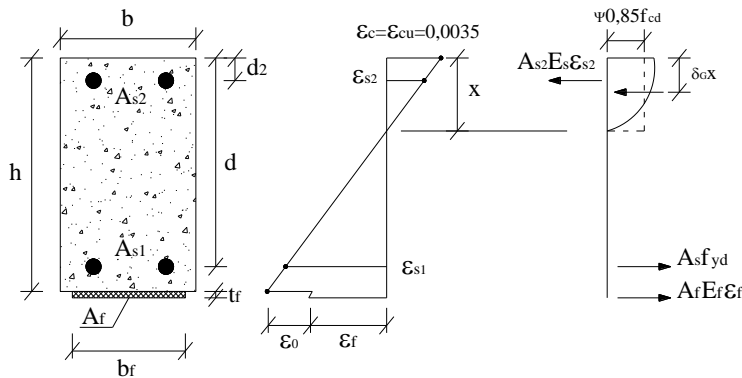


Figura 6.6: Secção sujeita a momento flector em estado limite último (adaptado de fib, 2001).

Admitida uma área de FRP e conhecidas as extensões neste e na armadura inferior, torna-se possível o cálculo do momento resistente da secção reforçada,  $M_{Rd}$ ,

$$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_Gx) + A_fE_f\varepsilon_f(h - \delta_Gx) + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}(\delta_Gx - d_2) \quad (6.15)$$

Onde,  $\delta_G = 0,4$ .

A área de reforço FRP só é considerada como suficiente quando, para além de verificar o critério de segurança dado pela equação (6.11), também verificar as condições,

- a) Cedência da armadura inferior de reforço à flexão

$$\varepsilon_{sl} = \varepsilon_{cu} \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (6.16)$$

- b) Limitação da extensão no FRP à extensão limite última,  $\varepsilon_{fud}$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \quad (6.17)$$

Considerando agora o outro modo de rotura, que envolve a cedência do aço seguida da rotura do FRP (devido a baixas percentagens de aço e FRP), modo este que só será possível teoricamente pois, normalmente, ocorre primeiro o descolamento do FRP, não sendo activado este mecanismo de rotura. No entanto, a metodologia de cálculo que permite a obtenção da área de FRP que levará a ocorrência teórica deste modo de rotura passa pela aplicação das equações (6.11) a (6.15), fazendo as seguintes alterações:

- a)  $\varepsilon_{cu}$  é substituído por  $\varepsilon_c$ ;  
 b)  $\varepsilon_f$  é substituído por  $\varepsilon_{fu}$ ;  
 c) Os parâmetros  $\psi$  e  $\delta_G$  são dados por,

$$\psi = \begin{cases} 1000 \varepsilon_c \left( 0,5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000 \varepsilon_c} & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (6.18)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000 \varepsilon_c}{4(6 - 1000 \varepsilon_c)} & \text{para } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 2)} & \text{para } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (6.19)$$

#### *Hipótese da perda de ligação entre o betão e o compósito*

Analizados os modos de rotura associados à hipótese de ligação perfeita entre o betão e o compósito, passam-se a analisar os modos de rotura relacionados com o descolamento do FRP pela interface betão-compósito. A norma divide estes modos de rotura em quatro tipos que devem ser avaliados e que são: descolamento devido a movimentos em fendas de corte; descolamento devido à formação de fendas de corte na extremidade do reforço;

descolamento na zona de ancoragem e por concentração de tensões em fendas de flexão; e descolamento provocado por irregularidades na superfície do betão.

*Descolamento devido a movimentos em fendas de corte*

Na verificação do descolamento devido a movimentos em fendas de corte, o modelo de análise não se encontra ainda devidamente estudado, mas o documento da *fib* apresenta um estudo recente, o qual propõe que o descolamento nas fendas de corte pode ser evitado limitando o esforço de corte actuante ao esforço de corte resistente,  $V_{RdI}$ , para elementos de betão armado sem armadura de esforço transverso. O cálculo de  $V_{RdI}$  é feito pelo EC2 considerando as seguintes modificações para o valor característico de resistência ao corte do betão,  $\tau_{Rk}$ , e para a relação longitudinal equivalente de armadura,  $\rho_{eq}$ ,

$$\tau_{Rk} = 0,15 f_{ck}^{1/3} \quad (6.20)$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f \frac{E_f}{E_s}}{bd} \quad (6.21)$$

No caso do esforço de corte actuante ser superior ao esforço de corte resistente da secção, deve ser previsto reforço ao corte do elemento.

*Descolamento devido à formação de fendas de corte na extremidade do reforço*

Com o reforço à flexão de um elemento, grande parte das vezes existe a possibilidade ocorrência de roturas por corte. Para que se evite este tipo de rotura, deve ser verificada a condição,

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} \quad (6.22)$$

*Descolamento causado por irregularidades na superfície do betão*

O descolamento causado por irregularidades na superfície do betão é outra das condições que deve ser verificada e para a qual a norma propõe a adopção de critérios de controlo de qualidade na preparação da superfície de betão de modo a evitar e/ou reduzir essas irregularidades.

*Descolamento na zona de ancoragem e por concentração de tensões em fendas de flexão*

Para a verificação desta condição são propostas três metodologias, sendo as duas mais importantes,

- a) Metodologia 1 – verificação da zona de ancoragem e limitação da extensão no FRP;
- b) Metodologia 2 – verificação da transferência de forças do FRP para o betão.

A metodologia 1 proposta pela norma implica a avaliação do esforço máximo de tracção imposto na zona de ancoragem, do comprimento de ancoragem mínimo e da limitação da extensão do FRP,  $\varepsilon_{f,lim}$ , de forma a evitar que o seu descolamento ocorra em zonas afastadas da ancoragem. O valor da extensão limite,  $\varepsilon_{f,lim}$ , proposto pela *fib*, situa-se entre os 6,5 ‰ e 8,5 ‰.

A metodologia de verificação da zona de ancoragem adoptada pela norma foi proposta por Neubauer e Rostásky, (1997) e baseia-se no modelo de Holzenkämpfer, (1994). Esta metodologia permite quantificar a força máxima de tracção no compósito que leva ao seu descolamento,  $N_{fa,max}$ , bem como o comprimento efectivo de ancoragem,  $l_{b,max}$ . Desta forma torna-se possível evitar o descolamento do FRP limitando a força de tracção instalada no compósito à força correspondente ao comprimento de amarração disponível na estrutura em reforço.

O comprimento máximo de ancoragem,  $l_{b,max}$ , é dado pela seguinte expressão,

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (6.23)$$

Onde,  $c_2$  é uma constante que deve ser obtida por calibração experimental (na impossibilidade de se efectuar essa calibração a norma recomenda que se tome  $c_2=2$ );  $t_f$  é a espessura de reforço FRP (em mm);  $E_f$  e  $f_{ctm}$  são o módulo de elasticidade do compósito (em MPa) e a resistência à tracção do betão (em MPa), respectivamente.

A força máxima,  $N_{fa,max}$ , que pode ser suportada pelo reforço FRP sem recurso a sistemas de ancoragem adicionais é,

$$N_{fa,max} = \alpha c_1 k_c k_b b \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \quad (N) \quad (6.24)$$

Onde,  $\alpha$  é um factor de redução ( $\alpha=0,9$  para vigas) para ter em conta a influência de possíveis fendas na tensão de aderência;  $c_1$  é uma constante que deve ser obtida por calibração experimental (na impossibilidade de se efectuar essa calibração a norma recomenda que se tome  $c_1=0,64$ );  $k_c$  é um factor que depende da qualidade do betão (geralmente  $k_c=1$ , mas para betões de baixa qualidade  $k_c=0,67$ ); e  $k_b$  é um factor geométrico que é dado por,

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad e \quad \frac{b_f}{b} \geq 0,33 \quad (6.25)$$

Onde,  $b$  e  $b_f$  são a largura da secção transversal do elemento (em mm) e a largura colada do reforço (em mm), respectivamente.

Esta metodologia considera-se satisfeita se,

$$N_{fa} \leq N_{fa,max} \quad (6.26)$$

Onde,  $N_{fa}$  é o valor de cálculo da força máxima que pode ser suportada pelo FRP na secção de dispensa e que pode ser obtido a partir do momento actuante,  $M_a$ , na secção situada à distância  $L$  do apoio (secção onde se dispensa o compósito), mediante o equilíbrio de forças nos diferentes materiais constituintes da secção. Uma aproximação de  $N_{fa}$  é dada por,

$$N_{fa} = \frac{M_e}{z \left( 1 + \frac{A_s E_s}{A_f E_f} \right)} \quad (6.27)$$

Onde,  $z$  é o braço do binário de forças ( $z \approx 0,9d$ );  $A_s$  é a área da armadura de reforço à flexão;  $A_f$  é a área da secção de reforço FRP; e  $E_f$  é o módulo de elasticidade do sistema FRP.

Note-se que para os casos em que o comprimento de ancoragem,  $l_b$ , é inferior ao máximo comprimento de ancoragem,  $l_{b,max}$ , a máxima força que pode ser ancorada já não é dada pela equação (6.24) mas sim por,

$$N'_{fa,max} = N_{fa,max} \frac{l_b}{l_{b,max}} \left( 2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad (6.28)$$

A metodologia 2 proposta pela norma, verificação da transferência de forças do FRP para o betão, impõe que a tensão de corte na interface,  $\tau_b$ , respeite a condição,

$$\tau_b \leq f_{cbd} \quad (6.29)$$

Onde,  $f_{cbd}$  é a resistência do betão ao corte e é dada por,

$$f_{cbd} = 1,8 \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c} \quad (6.30)$$

Sendo,  $f_{ctk0,05}$  a resistência do betão à tracção (MPa); e  $\gamma_c$  o coeficiente de segurança do betão.

A condição (6.29) deve ser verificada para duas regiões distintas: a primeira para a região onde a armadura ordinária se encontra em regime elástico ( $\varepsilon_{sl} < \varepsilon_{syd}$ ) e a segunda para a região onde a armadura se encontra plastificada ( $\varepsilon_{sl} \geq \varepsilon_{syd}$ ). As expressões que permitem estas verificações são,

$$\text{Se } \varepsilon_{sl} < \varepsilon_{syd} \text{ então } \frac{V_{sd}}{0,95db_f \left( 1 + \frac{A_s E_s}{A_f E_f} \right)} \leq f_{cbd} \quad (6.31)$$

$$\text{Se } \varepsilon_{sl} \geq \varepsilon_{syd} \text{ então } \frac{V_{sd}}{0,95db_f} \leq f_{cbd} \quad (6.32)$$

Onde,  $V_{sd}$  é o valor do esforço transversal na secção onde ocorre a plastificação das armaduras ordinárias.

#### 6.3.2.4. Estados limites de utilização (SLS)

Após a verificação de todas as condições impostas relativas aos estados ULS, a solução apontada como ideal terá de verificar também os limites impostos pelos SLS. Tal como dito em 6.3.1.1, os estados SLS que têm de ser verificados são a limitação de tensões, a limitação da deformação e o controlo de fendilhação.

Para a verificação do SLS importa conhecer a posição do eixo neutro, bem como o momento de inércia da secção fendilhada para as combinações de acções Quase Permanentes e Raras.

Atendendo às extensões existentes no elemento antes do reforço a análise torna-se dependente do momento actuante no elemento. Assumindo um comportamento linear



elástico do sistema FRP e assumindo que o betão não resiste à tracção, a análise em secção fendilhada é feita com base na Figura 6.7.

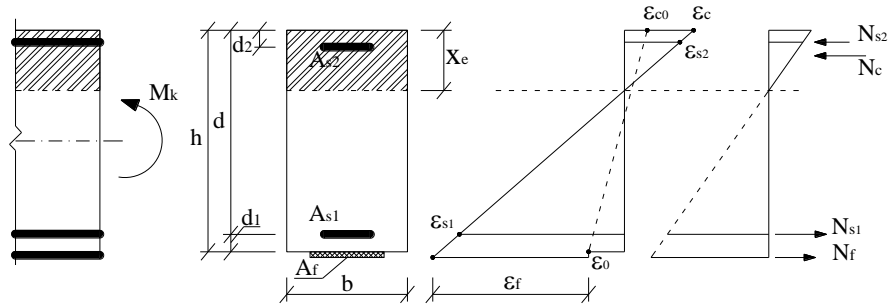


Figura 6.7: Análise linear elástica da secção fendilhada (adaptado de *fib*, 2001).

Impondo o equilíbrio interno de forças e impondo a compatibilidade de deformações, a profundidade do eixo neutro pode ser obtida pela equação,

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[ h - \left( 1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) x_e \right] \quad (6.33)$$

Onde,  $\alpha_f = E_f/E_c$ . Para valores de extensão inicial,  $\varepsilon_0$ , reduzidos, o termo  $(1 + \varepsilon_0/\varepsilon_c)$  torna-se aproximadamente 1 podendo a equação (6.33) ser resolvida directamente em ordem a  $x_e$ . No entanto, para valores elevados de  $\varepsilon_0$  quando comparados com a extensão no betão,  $\varepsilon_c$ , na fibra mais comprimida, a profundidade do eixo neutro e a extensão no betão são dados iterativamente pelas equações (6.33) e (6.34).

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left( h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1)A_{s2} \frac{(x_e - d_2)(h - d_2)}{x_e} - \alpha_s A_{s1} \frac{(d - x_e)(h - d)}{x_e}} \quad (6.34)$$

O momento de inércia da secção fendilhada,  $I_2$ , tal como o eixo neutro  $x_e$ , depende do momento actuante  $M_k$  e pode ser calculada por,

$$I_2 = \frac{bx_e^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2 \quad (6.35)$$

### Limitação das tensões

Segundo a norma *fib*, a limitação das tensões em serviço deve respeitar os limites a seguir expostos de modo a prevenir eventuais danos ou fluência excessiva no betão, cedência no aço e fluência excessiva ou rotura por fluência no reforço FRP. Com a aplicação do reforço FRP o estado de tensão no betão muda significativamente. Para evitar a compressão excessiva que pode levar ao aparecimento de fendas longitudinais e extensões residuais,

são impostas as seguintes limitações para a tensão de compressão no betão (estes limites são os indicados no EC2),

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c \leq \begin{cases} 0,60 f_{ck} & \text{para combinações Raras} \\ 0,45 f_{ck} & \text{para combinações Quase Permanentes} \end{cases} \quad (6.36)$$

Para prevenir a cedência do aço em serviço, o EC2 especifica,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_c \frac{d - x_e}{x_e} \leq 0,80 f_{yk} \quad \text{para combinações Raras} \quad (6.37)$$

O nível de tensão no FRP em serviço deve ser limitado de forma semelhante ao exposto para o aço. Assim, para combinações Quase Permanentes,

$$\sigma_f = E_f \left( \varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} \right) \leq \eta f_{fk} \quad \text{com} \quad \eta = \begin{cases} 0,8 & \text{para CFRP} \\ 0,5 & \text{para AFRP} \\ 0,3 & \text{para GFRP} \end{cases} \quad (6.38)$$

#### *Limitação da deformação*

A verificação ao estado limite de deformação é feita pelo método bilinear proposto pelo CEB. Os valores limites das deformações a adoptar são os definidos no EC2. Estes limites são função do tipo de estrutura ou elemento e têm em conta que a deformação de um elemento ou de uma estrutura não deve ser prejudicial ao seu correcto funcionamento ou ao seu aspecto. É devido a este facto que é habitual considerar que as condições de utilização de uma viga são alteradas quando a flecha,  $a$ , causada pelas cargas de serviço para a combinação Quase Permanente provocam uma flecha superior a  $L/250$ .

O método bilinear postula que a flecha,  $a$ , é o resultado da combinação da flecha de deformação estimada em secção não fendilhada,  $a_1$ , com a flecha de deformação em secção fendilhada,  $a_2$ . As duas flechas,  $a_1$  e  $a_2$ , são afectadas de um coeficiente de distribuição de tensões,  $\zeta_b$ , o qual permite ter em conta a contribuição do betão traccionado entre fendas. De acordo com esta metodologia a flecha,  $a$ , é dada por,

$$a = a_1 (1 - \zeta_b) + a_2 \zeta_b \quad (6.39)$$

O coeficiente de distribuição de tensões,  $\zeta_b$ , pode ser obtido consoante o momento actuante,  $M_k$ , seja maior ou menor que o momento de fendilhação,  $M_{cr}$ ,

$$\begin{aligned} \zeta &= 0 & \text{se } M_k < M_{cr} \\ \zeta &= 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{n/2} & \text{se } M_k > M_{cr} \end{aligned} \quad (6.40)$$

Os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  têm em conta as características da colagem do reforço FRP e o tipo de carregamento no elemento, respectivamente ( $\beta_1=0,5$  para aço liso e  $\beta_1=1$  para aço nervurado;  $\beta_2=0,5$  para carregamento de longa duração e  $\beta_2=1$  para carregamento de curta duração). O expoente  $n$  da potência toma-se igual a 2 para betões correntes (classes até C30/35) e igual a 3 para betões de elevada resistência (classes superiores a C30/35).

As flechas em secção não fendilhada,  $a_1$ , e em secção fendilhada,  $a_2$ , são obtidas pelas equações que derivam de uma análise elástica clássica,

$$a_1 = k_M l^2 \frac{M_k}{E_c I_1} \quad (6.41)$$

$$a_2 = k_M l^2 \left( \frac{M_0}{E_c I_{02}} + \frac{M_k - M_0}{E_c I_2} \right) \quad \text{e } M_k > M_0 \quad (6.42)$$

Onde,  $k_M$  é um coeficiente que depende das condições de apoio do elemento (para uma viga simplesmente apoiada com um carregamento uniformemente distribuído  $k_M=5/48$ );  $I_{02}$  é o momento de inércia da secção fendilhada antes do reforço;  $I_1$  e  $I_2$  são os momentos de inércia da secção não fendilhada e da secção fendilhada após o reforço, respectivamente e  $M_0$  e  $M_k$  são o momento actuante antes do reforço e o momento actuante após o reforço, respectivamente.

#### *Controlo da fendilhação*

Por último, na verificação quanto à abertura de fendas, dito controlo da fendilhação, a norma sugere que o valor característico da largura das fendas,  $W_k$ , seja avaliado de acordo com o especificado no EC2 (CEN, 2004). No entanto, o documento da *fib* sugere que a quantificação do valor característico da largura das fendas,  $W_k$ , seja feita segundo a equação,

$$W_k = \beta s_{rm} \zeta \varepsilon_2 \quad (6.43)$$

Onde,  $\beta$  é um coeficiente que relaciona o valor médio e o valor característico da largura das fendas ( $\beta=1,7$ );  $s_{rm}$  é a distância média entre fendas;  $\varepsilon_2$  é a extensão da armadura em regime fendilhado; e  $\zeta$  é um coeficiente de distribuição de tensões dado por,

$$\begin{aligned} \zeta &= 0 & \text{se } M_k < M_{cr} \\ \zeta &= 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{M_{cr}}{M_k} \right)^n & \text{se } M_k > M_{cr} \end{aligned} \quad (6.44)$$

A extensão da armadura em regime fendilhado,  $\varepsilon_2$ , pode ser estimada pela equação,

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_f A_f \varepsilon_0}{E_s A_{s1} + E_f A_f} \quad \text{e} \quad N_{rk} = \frac{M_k}{0,9d} \quad (6.45)$$

O cálculo da distância média entre fendas,  $s_{rm}$ , é feito de acordo com a equação,

$$s_{rm} = \frac{2f_{ctm} A_{c,eff}}{\tau_{fm} u_f} \frac{\xi_b E_f A_f}{E_s A_{s1} + \xi_b E_f A_f} \quad (6.46)$$

Onde,  $f_{ctm}$  é a resistência média do betão à tracção;  $\tau_{fm}$  é a tensão média de aderência do FRP ( $\tau_{fm}=1,25f_{ctm}$ );  $u_f$  é o perímetro de aderência do reforço FRP;  $A_f$  é a área da secção transversal do reforço FRP;  $E_f$  é o módulo de elasticidade do reforço FRP;  $A_{s1}$  é a área de armadura longitudinal inferior;  $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço;  $\xi_b$  é um parâmetro de aderência e  $A_{c,eff}$  é a área efectiva de betão traccionada dada por,

$$A_{c,eff} = \min \left\{ 2,5(h-d)b; \frac{(h-x)b}{3} \right\} \quad (6.47)$$

Onde,  $h$  e  $d$  são a altura e a altura útil da secção transversal do elemento, respectivamente;  $b$  é a largura da secção transversal do elemento e  $x$  é a distância da fibra extrema mais comprimida ao eixo neutro determinado em secção fendilhada.

Quanto ao parâmetro de aderência,  $\xi_b$ , é dado por,

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_f 4t_f} \quad (6.48)$$

Onde,  $\tau_{sm}$  é a tensão media de aderência das armaduras ordinárias ( $\tau_{sm}=1,8f_{ctm}$ );  $d_s$  é o diâmetro médio dos varões da armadura inferior; e  $t_f$  é a espessura do reforço FRP.

### 6.3.3. Documento do ACI (ACI 440.2R-02, 2002)

#### 6.3.3.1. Bases de cálculo

Para o cálculo em ULS e para a verificação em SLS do reforço obtido, devem ser utilizadas combinações de acções dadas pelo EC1 à excepção da combinação fundamental.

Assim, a combinação fundamental de acções e os restantes coeficientes encontram-se definidos no capítulo 9 da guideline ACI 318-05, (2004).

De uma maneira geral, as propriedades dos materiais disponibilizadas pelos fabricantes não são determinadas tendo em linha de conta os efeitos da exposição prolongada a condições ambientais. Segundo este documento, estes efeitos devem ser contabilizados logo nas propriedades iniciais dos materiais porque a longa exposição a vários tipos de ambientes pode reduzir as propriedades resistentes dos sistemas FRP, pelo que as propriedades destes mesmos materiais deverão ser afectadas de um coeficiente de segurança obtido com base na condição de exposição ambiental. Na Tabela 6.3 encontram-se os valores propostos pelo documento em análise para o factor de redução ambiental,  $C_E$ . Assim, o valor de cálculo da resistência à tracção do FRP,  $f_{fu}$ , é dado pelo produto do valor característico da resistência à tracção do FRP,  $f_{fu}^*$ , pelo factor de redução ambiental, como se mostra a seguir,

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (6.49)$$

De forma semelhante, o valor de cálculo da extensão máxima do FRP,  $\varepsilon_{fu}$ , é dado pelo produto do valor característico da extensão máxima no FRP,  $\varepsilon_{fu}^*$ , pelo factor de redução ambiental,

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (6.50)$$

Considera-se que o material FRP possui um comportamento linear elástico até à rotura, tal como na *fib*. O módulo de elasticidade de cálculo,  $E_f$ , pode ser determinado pela lei de Hooke, traduzida na equação,

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (6.51)$$

O ACI recomenda que os valores característicos da resistência à tracção e da extensão última do FRP devam ser fornecidos pelo fabricante, o qual os deverá obter a partir de resultados experimentais normalizados pela diferença entre o valor médio e três vezes o desvio padrão, de acordo com as equações,

$$f_{fu}^* = \overline{f_{fu}} - 3\sigma \quad (6.52)$$

$$\varepsilon_{fu}^* = \overline{\varepsilon_{fu}} - 3\sigma \quad (6.53)$$

Tabela 6.3: Factor de redução ambiental,  $C_E$ , para os diferentes tipos de FRP (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).

<i>Condições de exposição</i>	<i>Tipo de fibra e tipo de resina</i>	<i>Factor de redução ambiental <math>C_E</math></i>
Ambientes interiores	Carbono/Epoxi	0,95
	Vidro/Epoxi	0,75
	Aramida/Epoxi	0,85
Ambientes exteriores (pontes, pilares e parques de estacionamento a descoberto)	Carbono/Epoxi	0,85
	Vidro/Epoxi	0,65
	Aramida/Epoxi	0,75
Ambientes agressivos (instalações químicas, estações de tratamento de águas)	Carbono/Epoxi	0,85
	Vidro/Epoxi	0,50
	Aramida/Epoxi	0,70

### 6.3.3.2. Estado inicial

O nível de extensões iniciais,  $\varepsilon_{bi}$ , pode ser determinado através de uma análise elástica linear em secção fendilhada do elemento a reforçar.

Pelo anteriormente exposto, a metodologia de cálculo apresentada no ponto 6.3.1.3. *Estado inicial* é aplicável ao presente ponto com uma pequena alteração de notação:  $I_{02}$  deve ser substituído por  $I_{cr}$  e  $\varepsilon_0$  deve ser substituído por  $\varepsilon_{bi}$ .

### 6.3.3.3. Estados limites últimos (ULS)

A verificação aos ULS proposta pela guideline em análise considera os cinco modos de rotura presentes na Figura 6.8.

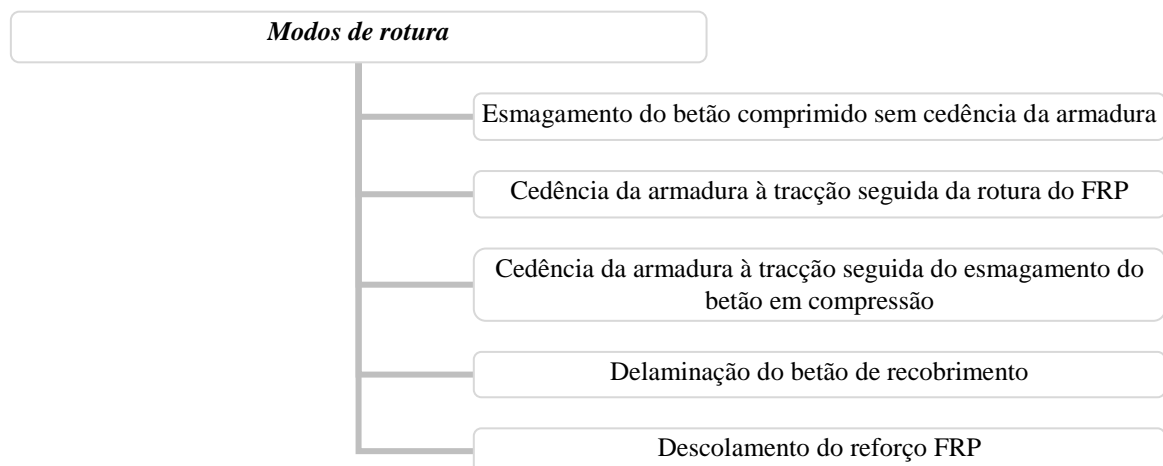


Figura 6.8: Modos de rotura.

Também nesta guideline o cálculo do reforço em ULS é feito admitindo a hipótese de ligação perfeita entre o compósito e o betão, tendo de verificar a condição,

$$\phi M_n \geq M_u \quad (6.54)$$

Onde,  $M_n$  representa o valor de cálculo do momento flector resistente,  $M_u$  representa o momento flector actuante e  $\phi$  é um factor de redução da resistência da secção reforçada de modo a ter em conta a redução da ductilidade da secção devido à aplicação do reforço FRP por colagem exterior. Segundo o exposto no documento, um elemento possui ductilidade suficiente se a extensão máxima na armadura ordinária,  $\varepsilon_s$ , na secção crítica e no instante da rotura for pelo menos 5 ‰. Assim, o factor de redução da resistência é dado em função da extensão máxima na armadura ordinária,  $\varepsilon_s$ , e da extensão de cedência da armadura,  $\varepsilon_{sy}$ , e é obtido pelas seguintes condições,

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_s \geq 0,05 \\ 0,70 + \frac{0,20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,70 & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (6.55)$$

Ainda em relação ao cálculo do momento flector resistente, é também proposta a utilização de um factor de redução de resistência,  $\psi_f$ , a aplicar à contribuição do FRP no cálculo do momento flector resistente,  $M_n$ , sendo o valor a considerar para este factor de 0,85.

Tal como no documento proposto pela *fib*, a rotura e o valor do momento flector resistente da secção são condicionados pelas máximas extensões admitidas no betão, aço e FRP. Então, de maneira a proporcionar uma suficiente aderência da ligação betão-compósito e a transferência necessária da força do compósito para o betão, a extensão máxima no FRP,  $\varepsilon_{fu}$ , deve ser limitada utilizando um coeficiente de redução,  $k_m$ , tal como mostra a equação,

$$\varepsilon_{fe} \leq k_m \varepsilon_{fu} \quad (6.56)$$

Onde,  $\varepsilon_{fe}$  é a máxima extensão ou extensão efectiva no FRP em estado limite último.

A aplicação do coeficiente de redução,  $k_m$ , visa então evitar a ocorrência de roturas prematuras sendo função do módulo de elasticidade do FRP,  $E_f$ , da espessura do reforço,  $t_f$ , e do número de camadas utilizadas,  $n$ . As condições que permitem determinar  $k_m$  são,

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left( 1 - \frac{nE_f t_f}{360000} \right) \leq 0,90 & \text{para } nE_f t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left( \frac{90000}{nE_f t_f} \right) \leq 0,90 & \text{para } nE_f t_f > 180000 \end{cases} \quad (6.57)$$

Onde,  $E_f$  deve entrar em  $N/mm^2$ ,  $t_f$  em  $mm$  e  $\varepsilon_{fu}$  deve ser adimensional. Note-se que o coeficiente de redução  $k_m$  é unicamente baseado na experiência adquirida e na investigação de reforço de elementos por colagem exterior de FRP, sendo portanto necessário desenvolver mais investigação sobre a ligação entre o FRP e o betão.

A tensão efectiva no reforço FRP,  $f_{fe}$ , é determinada assumindo um comportamento linear elástico perfeito para o FRP,

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (6.58)$$

Onde,  $E_f$  é o modulo de elasticidade do FRP.

Tendo em consideração o caso particular da viga em estudo, a extensão na armadura longitudinal inferior,  $\varepsilon_s$ , baseada no nível de extensão no FRP,  $\varepsilon_{fe}$ , é dada por,

$$\varepsilon_s = \left( \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi} \right) \left( \frac{d - c}{h - c} \right) \quad (6.59)$$

Onde,  $\varepsilon_{bi}$  é a extensão inicial na secção;  $d$  é altura útil do elemento e  $c$  é a profundidade do eixo neutro (Figura 6.9). Conhecida a extensão no aço e considerando que estes tem um comportamento elasto-plástico, a tensão no aço,  $f_s$ , é,

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (6.60)$$

Onde,  $f_y$  é a tensão de cedência do aço. Para determinar a tensão e a extensão no aço é necessário conhecer a posição do eixo neutro,  $c$ . Esta é feita por um processo iterativo arbitrando valores para a posição do eixo neutro,  $c$ , calculando as extensões em cada material da secção através da compatibilidade de extensões e avaliando o equilíbrio de forças internas na secção (equação (6.61)). Logo que se atinja o equilíbrio interno de forças na secção, o processo iterativo termina e obtêm-se a posição do eixo neutro.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c' \beta_1 b} \quad (6.61)$$

Os coeficientes  $\gamma$  e  $\beta_1$  são parâmetros que permitem simular a distribuição não linear de tensões na secção como uma distribuição rectangular equivalente de tensões (Figura 6.9).



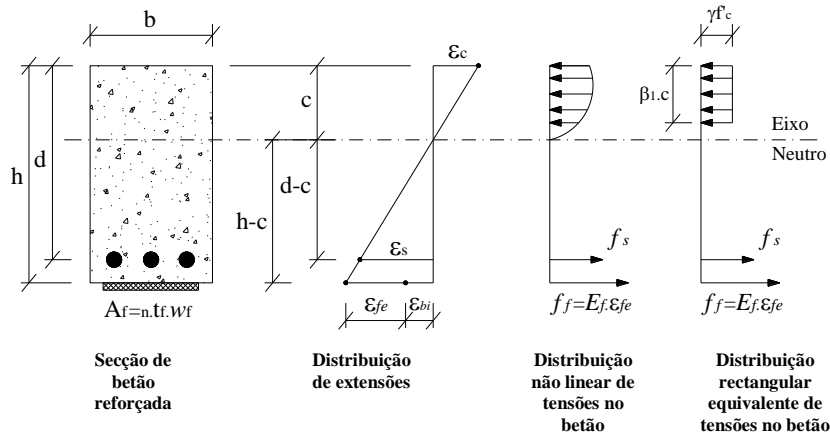


Figura 6.9: Distribuição de tensões e extensões numa secção à flexão (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).

O coeficiente  $\gamma$  toma o valor de 0,85 e o coeficiente  $\beta_1$  é dado consoante a resistência a resistência do betão à compressão,  $f'_c$ . Assim, se  $17,0 \leq f'_c \leq 27,5$  MPa,  $\beta_1 = 0,85$ . Para  $f'_c > 27,5$  MPa,  $\beta_1$  deve ser reduzido linearmente de 0,05 por cada incremento de resistência de 7 MPa, embora  $\beta_1$  não deva ser inferior a 0,65.

Conhecida a posição do eixo neutro, o momento flector resistente,  $M_n$ , é dado por,

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (6.62)$$

Como comprimento de colagem,  $l_b$ , o ACI propõe uma metodologia simplificada em que este é dado pelo maior dos valores entre  $d/2$  e 0,15 m. O comprimento de colagem é contabilizado a partir do ponto de inflecção do diagrama de momentos ou a partir do ponto em que o momento no diagrama iguala ao momento flector de fendilhação. Quando o reforço é constituído por mais que uma camada de reforço FRP, o comprimento de colagem a adoptar deve ser tal que a camada de reforço que fica em contacto com a superfície de betão deve ter um comprimento de colagem igual ao produto entre o número de camadas e o comprimento de colagem de uma só camada. As restantes camadas devem possuir um comprimento de colagem uma vez inferior ao comprimento da camada anterior.

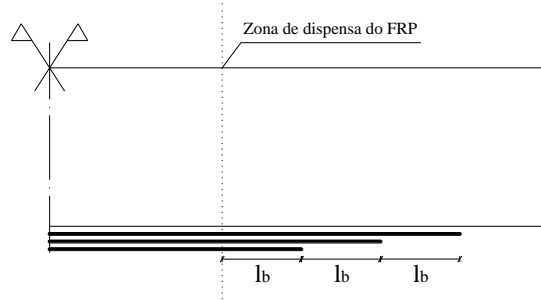


Figura 6.10: Comprimento de ancoragem de camadas sobrepostas.

#### 6.3.3.4. Estados limites de utilização (SLS)

Após a verificação de todas as condições impostas relativas aos estados ULS, a solução apontada como ideal terá de verificar também os limites impostos pelos SLS. Note-se que a guideline do ACI apenas contempla a verificação da limitação das tensões e das deformações, encontrando-se as disposições referentes a estas verificações no documento ACI 318-05, (2004).

##### Limitação das tensões

De acordo com a ACI 440.2R-02, as tensões na armadura devem ser limitadas a 80% da tensão de cedência do aço,  $f_y$ . O nível de tensão no aço,  $f_{s,s}$ , é obtido através de uma análise elástica em secção fendilhada da qual resulta a equação,

$$f_{s,s} = \frac{\left[ M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left( h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left( d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left( h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} \leq 0,8 f_y \quad (6.63)$$

Onde,  $M_s$  é o momento actuante na secção crítica para a combinação Rara de acções; e  $k$  é um coeficiente que multiplicado pela altura útil dá a posição aproximada do eixo neutro.  $k$  é determinado pela equação,

$$k = \sqrt{\left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)^2 + 2 \left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left( \frac{h}{d} \right) \right) - \left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)} \quad (6.64)$$

Onde,  $\rho_s$  e  $\rho_f$  são a percentagem de aço e de reforço FRP, respectivamente, e é dada pelo quociente entre a área de reforço (aço ou FRP) e o produto da base pela altura útil da secção.

A tensão no reforço FRP,  $f_{f,s}$ , é calculada, considerando um comportamento linear elástico, pela equação,

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left( \frac{E_f}{E_s} \right) \frac{h - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f \quad (6.65)$$

Os limites impostos a esta tensão dependem do tipo de fibras e são impostos tendo em conta os ciclos de fadiga a que o FRP irá estar exposto. Assim, para fibras de vidro  $f_{f,s} \leq 0,20 f_{fu}$ ; para fibras de aramida  $f_{f,s} \leq 0,30 f_{fu}$ ; e para fibras de carbono  $f_{f,s} \leq 0,55 f_{fu}$ .

#### *Limitação das deformações*

No respeitante aos estados limites de deformação, é proposto que a verificação da deformação a curto prazo seja efectuada com base num momento de inércia efectivo para a secção transversal do elemento,  $I_e$ , a qual traduz a diminuição de rigidez devido à fendilhação. O momento de inércia efectivo, como seria de esperar, é sempre inferior ao momento de inércia da secção não fendilhada,  $I_g$ , podendo ser calculado da seguinte forma,

$$I_g = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (6.66)$$

Onde,  $I_{cr}$  é o momento de inércia da secção fendilhada;  $M_a$  é o momento actuante para combinações Raras; e  $M_{cr}$  é o momento de fendilhação dado por,

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{h - c} \quad \text{e} \quad f_r = 7,5 \sqrt{f_c'} \quad (6.67)$$

Os limites de deformação máxima a curto prazo em serviço,  $\delta$ , impostos pela ACI 318-05, (2004), dependem do tipo de elemento estrutural e variam desde  $L/180$  para elementos cuja flecha não afecte a sua utilização (p.ex. telhados e elementos não estruturais) até  $L/480$  para elementos cuja flecha afecte a sua utilização (p.ex. lajes de pavimentos e vigas).

Em relação à deformação a longo prazo, é proposto que esta seja determinada adicionando ao valor da deformação a curto prazo a parcela correspondente à deformação por fluência obtida através da multiplicação da deformação a curto prazo por um factor  $\lambda_\Delta$  dado por,

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (6.68)$$

Onde,  $\rho'$  é a percentagem de armadura de compressão na secção crítica e  $\xi$  é um factor que depende da duração da carga (duração de cinco ou mais anos,  $\xi=2,0$ ; duração superior a um ano,  $\xi=1,4$ ; duração superior a meio ano,  $\xi=1,2$ ; e duração superior a três meses,  $\xi=1,0$ ).

#### 6.3.4. Documento do CNR (CNR, 2004)

##### 6.3.4.1. Bases de cálculo

Para o cálculo em ULS e verificação aos SLS são adoptadas as mesmas combinações de acções que são propostas pela norma da *fib*. Assim, as combinações a usar e os respectivos coeficientes são dados pelo EC2.

A guideline do CNR apresenta como primeira consideração o problema existente na obtenção dos valores característicos das propriedades dos sistemas FRP curados *in-situ* quando comparado com os sistemas pré-fabricados. Como é de esperar, as características e propriedades de um sistema curado *in-situ* são muito menos regulares e fiáveis do que um sistema pré-fabricado. Este problema tem maior expressão no emprego de mantas (unidireccionais ou multidireccionais) pois, quando comparado com um laminado pré-fabricado, a espessura e quantidade de resina apresentam variações consideráveis. É devido a estas situações que a norma recomenda que no dimensionamento do reforço com mantas se utilizem os valores característicos das propriedades mecânicas fornecidos pelo fornecedor.

No dimensionamento do reforço utilizando mantas, a largura a considerar deve ser a da manta,  $b_f$ , e a espessura deve ser uma espessura equivalente,  $t_{eq}$ , dada pela expressão,

$$t_{eq} = \frac{A_{rt}}{1000} \quad \text{e} \quad A_{rt} = \frac{p_t}{n \rho_{fib}} \quad (6.69)$$

Onde,  $p_t$  é a massa da manta em  $\text{g/m}^2$ ;  $n$  é o número de direcções das fibras;  $\rho_{fib}$  é a densidade das fibras em  $\text{g/cm}^3$ ; e  $t_{eq}$  é a espessura equivalente em mm.

Para estes sistemas, a determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas é feita aplicando um factor ao módulo de elasticidade,  $\alpha_{fE}$ , e outro à resistência à tracção,

$\alpha_{ff}$ , de forma a considerar o efeito da resina no compósito após impregnação. Estes factores devem ser disponibilizados pelo fornecedor do sistema, sendo que no caso de não o ser possível deve ser tomado um valor inferior a 0,9. O valor característico do módulo de elasticidade,  $E_f$ , é dado por,

$$A_f E_f = \alpha_{fE} A_{rt} E_{fib} \quad (6.70)$$

Onde,  $E_{fib}$  é o módulo de elasticidade de uma fibra. Da equação (6.70) pode-se concluir que o valor característico do módulo de elasticidade é dado por  $\alpha_{fE} E_{fib}$ . De maneira semelhante, o valor característico da resistência à tracção,  $f_{fk}$ , é dado por,

$$A_f f_{fk} = \alpha_{ff} A_{rt} f_{fib} \quad (6.71)$$

Onde,  $f_{fib}$  é o valor característico da resistência à tracção de uma fibra. Tal como para o modulo de elasticidade, o valor característico da resistência à tracção é dado por  $\alpha_{ff} f_{fib}$ .

Após serem conhecidos os valores característicos da resistência à tracção e do módulo de elasticidade é possível conhecer, através da lei de Hooke, o valor característico da extensão máxima,  $\varepsilon_{fk}$ . Os valores de cálculo da resistência à tracção e da extensão podem então ser facilmente obtidos pela equação,

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (6.72)$$

Onde,  $X_d$  é o valor de cálculo de determinada propriedade;  $\eta$  é um factor correctivo que depende das condições de exposição do reforço e dos efeitos a longo prazo;  $X_k$  é o valor característico da propriedade em causa; e  $\gamma_m$  é um coeficiente de segurança parcial.

O factor correctivo,  $\eta$ , toma diferentes valores consoante se esteja a analisar estados limites últimos (ULS) ou estados limites de utilização (SLS). Para ULS, o factor correctivo designa-se por  $\eta_a$ , e pretende traduzir os efeitos das condições ambientais (alcalinidade do meio, humidade, temperatura, ciclos térmicos, ciclos de gelo/degelo e radiações ultravioleta) nas propriedades mecânicas do compósito. Os valores a adoptar para este factor são iguais aos adoptados pela guideline do ACI para o factor de redução  $C_E$ , presentes na Tabela 6.3.

No respeitante aos SLS, o factor correctivo toma a designação de  $\eta_1$ , e pretende simular os efeitos da degradação das propriedades do FRP a longo prazo devido a efeitos de fluência, relaxação e fadiga. Este factor depende do tipo de carregamento a que o elemento está

sujeito. Assim, quando este se encontra submetido a mais que um tipo de carregamento, o factor de redução deve ser obtido do produto entre os factores correspondentes aos respectivos carregamentos.

Tabela 6.4: Factor correctivo  $\eta_1$  para o FRP devido aos efeitos a longo prazo (adaptado de CNR, 2004).

Tipo de carregamento	Tipo de fibra e tipo de resina	$\eta_1$
Contínuo (fluência e relaxação)	Vidro/Epoxi	0,30
	Aramida/Epoxi	0,50
	Carbono/Epoxi	0,80
Cíclico (fadiga)	Todos	0,50

#### 6.3.4.2. Estado inicial

Tal como o exposto anteriormente para as normas, o elemento que irá ser sujeito a reforço possui extensões na face onde este vai ser instalado. O cálculo das extensões em serviço e antes do reforço é feito tal como o exposto para a norma *fib* no número 6.3.2.1.

#### 6.3.4.3. Estados limites últimos (ULS)

A guideline proposta pelo CNR considera os quatro modos de rotura da Figura 6.11 como sendo os mais condicionantes. Os dois modos relacionados com a rotura por descolamento do FRP nas extremidades e rotura por descolamento ao longo do reforço são evitados fazendo a limitação da tensão de cálculo e da extensão de cálculo do FRP, para a determinação do momento resistente.

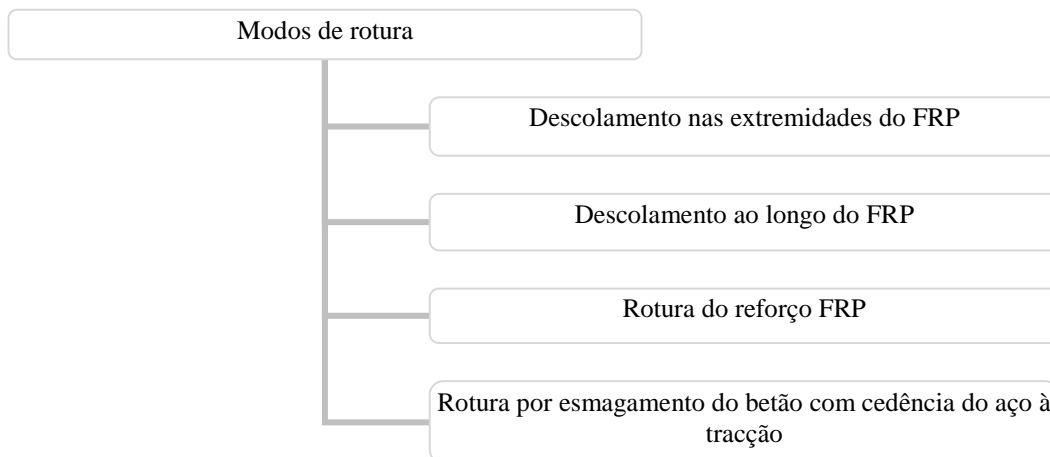


Figura 6.11: Modos de rotura.

À semelhança do proposto pela norma *fib*, a determinação da área de FRP necessária é feita admitindo a hipótese de ligação perfeita entre o compósito e o betão e verificando o

critério dado pela equação (6.11). No entanto, na determinação do momento flector resistente de cálculo,  $M_{Rd}$ , o CNR recomenda a limitação da extensão máxima de cálculo do FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , ao mínimo dos valores dados por,

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} \quad (6.73)$$

Onde,  $\varepsilon_{fk}$  é o valor característico da extensão máxima no FRP;  $\eta_a$  é um factor correctivo que traduz os efeitos das condições ambientais (igual ao coeficiente de redução ambiental  $C_E$  adoptado pela guideline do ACI e especificado na Tabela 6.3);  $\gamma_f$  é o coeficiente parcial de segurança (Tabela 6.5); e  $\varepsilon_{fdd}$  é o valor de cálculo da extensão correspondente ao início do descolamento do FRP. Esta extensão é dada por,

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \quad (6.74)$$

Onde,  $E_f$  é o módulo de elasticidade do FRP; e  $f_{fdd,2}$  é o valor de cálculo da tensão última de tracção no FRP considerando a rotura por descolamento intermédio do FRP, e que é dado pelo produto de um coeficiente de eficiência,  $k_{cr}$ , que toma o valor de 3 quando não é conhecido o valor de calculo da tensão última de tracção no FRP considerando a rotura por descolamento nas extremidades do reforço,  $f_{fdd}$ . Assim, o valor de cálculo da tensão última de tracção no FRP é dado por,

$$f_{fdd,2} = k_{cr} f_{fdd} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fk}}{t_f}} \quad (6.75)$$

Onde,  $\gamma_{f,d}$  e  $\gamma_c$  são os coeficientes parciais do FRP (Tabela 6.5) e do betão, respectivamente;  $\Gamma_{Fk}$  é o valor característico da energia de fractura da interface betão-compósito; e  $t_f$  é a espessura do reforço FRP. O valor característico da energia de fractura da interface,  $\Gamma_{Fk}$ , é dado por,

$$\Gamma_{Fk} = 0,03k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad (6.76)$$

Onde,  $f_{ck}$  é o valor característico da resistência à compressão do betão;  $f_{ctm}$  é o valor médio da resistência à tracção do betão; e  $k_b$  é um factor geométrico dado por,

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad \text{e} \quad \frac{b_f}{b} \geq 0,33 \quad (6.77)$$

Onde,  $b$  é a largura da secção transversal da secção; e  $b_f$  é a largura do FRP.

O comprimento óptimo de ancoragem,  $l_e$ , pode ser estimado por,

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}} \quad (6.78)$$

Tabela 6.5: Coeficientes de segurança parciais para os sistemas e produtos FRP (adaptado de CNR, 2004).

<i>Modo de rotura</i>	<i>Coeficiente de segurança</i>	<i>Aplicação de sistemas certificados globalmente</i>	<i>Aplicação de sistemas certificados produto a produto</i>
Rotura do FRP	$\gamma_f$	1,10	1,25
Descolamento do FRP	$\gamma_{f,d}$	1,20	1,50

Os restantes modos de ruína, por rotura do FRP e por esmagamento do betão com cedência do aço à tracção, influenciam o cálculo e o valor do momento resistente. Para o cálculo considerando a rotura do FRP, é tomado o valor da extensão no FRP,  $\varepsilon_f$ , igual ao valor da extensão máxima de cálculo do FRP,  $\varepsilon_{fd}$ . Já para o cálculo considerando a rotura por esmagamento do betão com cedência do aço à tracção, é tomado o valor da extensão no betão,  $\varepsilon_c$ , igual ao valor da extensão máxima de cálculo no betão,  $\varepsilon_{cu}$ . Para ambos os casos, o perfil de extensões na secção é linear sendo assim possível determinar as restantes extensões nos diferentes materiais ao longo da secção.

Deve também ser verificado um critério de ductilidade, de modo a que a rotura ocorra com plastificação das armaduras ordinárias. Este critério é função da profundidade do eixo neutro e depende da extensão máxima do betão,  $\varepsilon_{cu}$ , e da extensão de cedência das armaduras ordinárias,  $\varepsilon_{sy}$ . Assim,

$$\xi = \frac{x}{d} \leq \xi_{\lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad (6.79)$$

#### 6.3.4.4. Estados limites de utilização (SLS)

À semelhança do exposto na norma da *fib*, os estados SLS a verificar são a limitação das tensões, a limitação da deformação e o controlo da fendilhação. No entanto, a guideline proposta pelo CNR remete estas verificações para os regulamentos Nacionais Italianos. Na análise feita optou-se por adoptar a metodologia proposta pela *fib* tendo sempre em conta o proposto também pelo CNR. Esta verificação é feita admitindo que os materiais têm um comportamento linear elástico, quer para análise em secção fendilhada ou secção não fendilhada. Tal como o proposto pela *fib*, para a verificação aos SLS importa conhecer a



posição do eixo neutro e a inércia da secção fendilhada para as combinações de acções Quase Permanentes e Raras, as quais são dadas pelas equações (6.33) a (6.35).

#### Limitação das tensões

Segundo o CNR, as tensões em serviço no sistema FRP para combinações de acções Quase Permanentes devem ser limitadas a,

$$\sigma_f \leq \eta f_{fk} \quad (6.80)$$

Onde,  $f_{fk}$  é o valor característico da resistência do FRP; e  $\eta$  é um factor correctivo para ter em conta os efeitos a longo prazo no reforço, e que depende do tipo de carregamento e do tipo de fibra (ver Tabela 6.4). Para as tensões em serviço no betão e na armadura, os limites que estas têm de verificar são os adoptados na norma *fib* e que se encontram nas equações (6.36) e (6.37). O cálculo das tensões nos diferentes materiais é feito com base no princípio da sobreposição dos efeitos (PSE), considerando a condição  $M = M_0 + \Delta M_1$ , sendo  $M_0$  o momento actuante antes do reforço e  $\Delta M_1$  o acréscimo de momento após o reforço. Então, aplicando o PSE vem,

<i>Tensão no betão</i>	$\sigma_c = \sigma_{c0} + \sigma_{c1}$	$\sigma_{c0} = \frac{M_0}{W_{0,c}^s}$	$\sigma_{c1} = \frac{\Delta M_1}{W_{1,c}^s}$
<i>Tensão no aço</i>	$\sigma_s = \sigma_{s0} + \sigma_{s1}$	$\sigma_{s0} = \frac{n_s M_0}{W_{0,s}^i}$	$\sigma_{s1} = \frac{n_s \Delta M_1}{W_{1,s}^i}$
<i>Tensão no FRP</i>	$\sigma_f = \frac{n_f \Delta M_1}{W_{1,f}^i}$		

Onde,

$W_{0,c}^s = \frac{I_0}{x_0}$	Módulo de resistência relativamente à fibra mais comprimida, antes do reforço;
$W_{0,s}^i = \frac{I_0}{(d - x_0)}$	Módulo de resistência relativamente ao aço à tracção, antes do reforço;
$W_{1,c}^s = \frac{I_1}{x_1}$	Módulo de resistência relativamente à fibra mais comprimida, após o reforço;
$W_{1,s}^i = \frac{I_1}{(d - x_1)}$	Módulo de resistência relativamente ao aço à tracção, após o reforço;
$W_{1,f}^i = \frac{I_1}{(h - x_1)}$	Módulo de resistência relativamente ao reforço FRP.
$n_s = \frac{E_s}{E_c}$	Relação de módulos;

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad \text{Relação de módulos.}$$

O eixo neutro,  $x_0$ , e os momentos de inércia antes e após o reforço,  $I_0$  e  $I_1$ , devem ser determinados tendo em conta o estado fendilhado ou não fendilhado da secção.

#### *Controlo da deformação e da fendilhação*

O controlo da deformação e da fendilhação é feito segundo o proposto pela *fib*. Assim, o controlo da deformação é feito aplicando as equações (6.39) a (6.42), e o controlo da fendilhação é feito aplicando as equações (6.43) a (6.48).

### **6.3.5. Apresentação de resultados**

No reforço à flexão do elemento teórico apresentado em 6.2, aplicando os documentos da *fib*, do ACI e do CNR em análise neste trabalho, foram considerados os esforços actuantes em estado limite último dados na Tabela 6.6. Os valores de momento flector apresentados são referentes à secção mais solicitada e variam consoante a norma aplicada devido às combinações de acções consideradas por cada uma. Note-se que a sobrecarga a que a viga irá ser sujeita é de  $8 \text{ kN/m}^2$ .

Tabela 6.6: Momentos flectores actuantes em ULS na viga a reforçar.

Momento flector actuante – $M_{sd} \text{ (kN.m)}$	<i>fib</i>	ACI	CNR
	325,7	318,3	325,7

O reforço à flexão foi efectuado com recurso a laminados de carbono – CFRP. Na aplicação das normas foi adoptado sempre o mesmo tipo de laminado para que seja possível a comparação directa entre os resultados obtidos. As propriedades principais do laminado usado encontram-se na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Características principais do sistema laminado de CFRP.

	Largura $b_f \text{ (mm)}$	Espessura $t_f \text{ (mm)}$	Valor característico da resistência à tracção $f_{fk,0.05} \text{ (GPa)}$	Alongamento para dimensionamento $\varepsilon_{fud} \text{ (‰)}$	Módulo elasticidade $E_f \text{ (GPa)}$
Laminado CFRP	90	1,4	2,5	6,5	210

As condições iniciais do elemento a reforçar consideradas na análise segundo os três documentos foram as indicadas na Tabela 6.8, tendo sido determinadas na secção de maior momento para as cargas em serviço.

Tabela 6.8: Estado inicial da viga.

<i>Eixo neutro</i> $x_0$ (m)	<i>Inércia fendilhada</i> $I_{02} / I_{cr}$ (m <sup>4</sup> )	<i>Extensão de compressão no betão</i> $\varepsilon_{co}$ (‰)	<i>Extensão de tracção no betão</i> $\varepsilon_o$ (‰)
0,147	0,001690	0,388	1,193

O dimensionamento do reforço é feito para os estados limites últimos. Da aplicação dos diferentes documentos resultaram as soluções de reforço apresentadas na Tabela 6.9. As soluções obtidas segundo o documento da *fib* e do ACI, resultam da situação condicionante em que ocorre *cedência da armadura seguida de esmagamento do betão*. Esta situação implica que a extensão no betão, na fibra mais afastada à compressão, seja considerada igual à extensão de rotura do betão,  $\varepsilon_{cu}$ , sendo adoptado  $\varepsilon_{cu}=3,5$  ‰ pela *fib* e  $\varepsilon_{cu}=3,0$  ‰ pelo ACI. Note-se que o modo de rotura que condicionou a solução obtida pelo documento do ACI é o modo de rotura admitido como mais provável de ocorrer dado que todos os outros estão, à partida, evitados devido aos coeficientes utilizados ao longo dos cálculos.

A solução obtida segundo o documento do CNR resulta da situação em que ocorre *rotura do FRP*. Este modo de rotura é devido à baixa extensão de cálculo do FRP admitida por este documento quando comparada com a extensão admitida pelo outros dois documentos.

Tabela 6.9: Soluções de reforço FRP obtida em ULS.

	<i>Momento resistente sem reforço</i> $M_{Rd}$ (kN.m)	<i>Nº de camadas de laminado</i>	<i>Posição do eixo neutro</i> $x_0$ (m)	<i>Extensão no betão</i> $\varepsilon_c$ (‰)	<i>Extensão no FRP</i> $\varepsilon_f$ (‰)	<i>Momento resistente com reforço</i> $M_{Rd}$ (kN.m)	<i>Acréscimo de resistência</i>
<i>fib</i>	256,8	4 a par	0,24	3,50	4,00	343,9	33,9%
<i>ACI</i>	256,8	5 a par	0,21	3,00	4,37	364,2	41,8%
<i>CNR</i>	256,8	4 a par + 4 sobrepostas	0,24	1,87	1,68	326,0	26,9%

Do dimensionamento em ULS obteve-se uma solução de reforço de 4 camadas de laminado a par segundo a *fib*, 5 camadas de laminado a par segundo o ACI e 4 camadas a par mais 4 camadas sobrepostas às primeiras segundo o CNR. Pela análise da Tabela 6.9 pode-se verificar que o momento flector resistente da secção reforçada difere consoante o documento aplicado, sendo o maior valor obtido segundo o ACI e o menor valor obtido segundo o CNR.

Como já referido, o modo de rotura que controla o dimensionamento segundo os documentos da *fib* e do ACI é aquele em que ocorre cedência do aço e rotura do betão, ao contrário do que se passa no documento do CNR onde o dimensionamento é controlado

pela rotura do FRP. Isto deve-se ao CNR propor que a extensão de cálculo do FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , seja o valor mínimo entre a extensão de cálculo correspondente ao início do descolamento do FRP,  $\varepsilon_{fdd}$ , e o valor característico da extensão máxima no FRP minorada com os respectivos coeficientes (equação (6.73)). Assim, sendo a extensão de cálculo do FRP limitada a um valor baixo quando comparado com o valor admitido pelas propostas da *fib* e do ACI, o momento flector resistente também será baixo. Daqui se justifica que a proposta do CNR resulte num menor valor de momento resistente com uma maior quantidade de reforço e que o modo de rotura condicionante seja a rotura do FRP.

Ao fazer uma comparação dos parâmetros da solução do CNR com os parâmetros das soluções da *fib* e do ACI, facilmente se poderá concluir que, à partida, o modo de rotura que irá ocorrer não será a rotura pelo FRP mas sim rotura por esmagamento do betão, já que a área de FRP é bastante elevada quando comparada com as outras duas soluções. Desta forma conclui-se que a limitação da extensão de cálculo imposta pelo CNR não é a mais correcta pois leva a resultados que poderão não corresponder à realidade.

Todos os documentos propõem a adopção de um comprimento de colagem ou comprimento óptimo de colagem que se assemelha ao comprimento de amarração das armaduras de aço. Os critérios impostos pelos diferentes documentos para a determinação deste comprimento são diferentes, resultando nos valores apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10: Comprimento de colagem do reforço FRP.

<i>Comprimento de colagem (m)</i>	<i>fib</i>	<i>ACI</i>	<i>CNR</i>
	0,26	0,28	0,26

Pela análise dos resultados pode-se concluir que os comprimentos de colagem são idênticos para as três normas.

No reforço de elementos à flexão, normalmente existe um aumento do esforço transversal actuante no elemento. Desta forma, torna-se necessário prever a necessidade de reforço ao corte ao longo do elemento ou de ancoragem nas extremidades do reforço FRP para que se evitem roturas por descolamento devido à formação de fendas de corte e por descolamento nas extremidades. Segundo os três documentos analisados, em todas as soluções obtidas existe a necessidade de ancorar as extremidades do reforço para que se evite a rotura por descolamento devido à formação de fendas de corte nas extremidades. Segundo o proposto pelo documento da *fib*, existe também a necessidade de prever o reforço ao corte do elemento para que se evitem perdas de ligação entre o betão e o compósito por

descolamento em fendas de corte. Já os documentos do ACI e do CNR não prevêem a necessidade de reforço pois excluem logo à partida este tipo de rotura empregando, para tal, coeficientes de redução de resistência e limitando a tensão e a extensão de cálculo no laminado.

A verificação aos estados limites de serviço das soluções obtidas em ULS, feita pelas propostas em estudo, é algo diferente no que respeita à filosofia aplicada bem como aos limites impostos.

Tabela 6.11: Resultados obtidos para a limitação das tensões em SLS.

(Mpa)	Combinações Quase permanentes			Combinações Raras	
	Tensão no betão - $\sigma_c$	Tensão no aço - $\sigma_s$	Tensão no FRP - $\sigma_f$	Tensão no betão - $\sigma_c$	Tensão no aço - $\sigma_s$
<i>fib</i>	9,8	-	15,0	17,5	270,8
<i>ACI</i>	-	209,3	0,58	-	321,2
<i>CNR</i>	10,8	190,4	21,3	18,2	301,6

Legenda:

- Verifica os limites

- Não verifica os limites

A verificação da limitação das tensões segundo o documento da *fib* rege-se pelos limites impostos pelo EC2 para o aço e para o betão. Desta forma, como o limite das tensões no betão imposto pelo EC2 é bastante conservador e se destina a ser aplicado a elementos dimensionados sem necessidade de reforço, o elemento reforçado não consegue cumprir esse limite, como se pode observar pelos resultados da Tabela 6.11. O nível de tensão admitido no FRP varia de acordo com o tipo de fibra, sendo que a solução obtida cumpre a limitação imposta. Também o aço cumpre os limites de tensão impostos.

O ACI não impõe um limite de tensão no betão ao contrário dos outros documentos. Este apenas impõe limites de tensão no aço e no FRP, sendo que o limite de tensão no FRP, tal como nos outros documentos, depende do tipo de fibra. O limite de tensão no aço e no FRP é cumprido para a combinação Quase Permanente de acções. No entanto, apesar da tensão no aço para a combinação Rara de acções não cumprir o limite, considera-se que esta limitação é verificada pois a tensão obtida é praticamente igual à tensão limite e os coeficientes de segurança empregues ao longo dos cálculos permitem a existência de alguma margem livre de resistência. Desta forma é possível fazer com que o reforço seja mais económico, dispensando a aplicação de mais laminados.

A metodologia proposta pelo CNR é muito semelhante à proposta pela *fib*, já que os limites de tensão a aplicar são remetidos para os regulamentos de cada país. Como se pode verificar pela análise da Tabela 6.11, a tensão no aço e no FRP verifica os limites impostos ao contrário do betão que não consegue respeitar o limite de tensões imposto, para ambas as combinações de acções.

Pela análise da Tabela 6.11 pode-se verificar que os três documentos propõem a verificação dos limites das tensões no FRP apenas para a combinação Quase Permanente de acções. No entanto, a verificação para a combinação Rara de acções também faria todo o sentido já que o valor do carregamento resultante desta combinação é superior ao dado pela combinação Quase Permanente. Quanto à verificação das tensões no betão e no aço, também não existe um consenso entre os documentos, como se pode observar pela Tabela 6.11.

No respeitante ao betão, o ACI não propõe nenhuma verificação do nível de tensões, embora seja pertinente que essa verificação seja feita. Já em relação ao aço, a *fib* propõe a verificação do limite de tensão apenas para a combinação Rara de acções, onde é de esperar tensões mais elevadas.

Das três soluções obtidas, pode-se verificar que apenas as tensões da *fib* e do CNR são idênticas, existindo uma discrepância em relação às do ACI principalmente na tensão no FRP.

No respeitante ao controlo de deformações em SLS, o ACI propõe a verificação da deformação a tempo imediato e a longo prazo ao contrário dos outros dois documentos que apenas propõem a verificação da deformação a longo prazo.

Em relação aos limites de deformação a aplicar, o documento da *fib* e do CNR remetem estes limites para os documentos nacionais, neste caso o EC2, pelo que se adoptou  $L/250$ . Já o ACI propõe um limite mais conservador,  $L/480$  para elementos em que a flecha afecte a sua utilização.

A verificação da deformação segundo o proposto pela *fib* e pelo CNR é feita para a combinação Quase Permanentes e combinação Rara de acções, enquanto que o ACI enuncia que a verificação apenas deva ser feita para a combinação Quase Permanente de acções.

Tabela 6.12: Resultados obtidos para o controlo da deformação em SLS.

(m)		Combinações Quase permanentes			Combinações Raras		
		Deformação	Deformação máxima		Deformação	Deformação máxima	
<i>fib</i>	Tempo imediato	-	-	-	-	-	-
	Longo prazo	0,00580	0,0200	L/250	0,00936	0,0200	L/250
<i>ACI</i>	Tempo imediato	0,00630	0,0104	L/480	-	-	-
	Longo prazo	0,0181	0,0104	L/480	-	-	-
<i>CNR</i>	Tempo imediato	-	-	-	-	-	-
	Longo prazo	0,00583	0,0200	L/250	0,00938	0,0200	L/250

Legenda:   - Verifica os limites   - Não verifica os limites

Pela análise da Tabela 6.12 pode-se verificar que todos os limites são cumpridos à excepção da flecha a longo prazo para a combinação Quase Permanente de acções calculada segundo o ACI. A determinação do valor desta flecha depende do tempo de carregamento, tendo sido considerado 5 ou mais anos. Esta flecha é determinada a partir da flecha a tempo imediato afectando-a de um coeficiente que tem em conta os efeitos de fluência e relaxação, tornando-se assim num resultado um pouco aproximado.

Quanto ao controlo da fendilhação, a proposta do ACI não propõe a verificação da abertura de fendas. Poderá esta ausência ser uma limitação deste documento e que eventualmente será viável a sua correcção.

O documento da *fib* propõe a verificação da abertura de fendas para a combinação Quase Permanente e combinação Rara de acções. Esta verificação é feita tendo em conta o tipo de aço utilizado (nervurado ou liso), a duração das cargas aplicadas e o tipo de betão existente. Quanto à dimensão máxima das fendas, o documento da *fib* remete para os regulamentos em vigor em cada país, pelo que a dimensão máxima das fendas foi determinada pelo EC2.

O CNR propõe que seja avaliada e controlada a abertura de fendas remetendo também esta verificação para os documentos nacionais de cada país. Assim, os resultados obtidos por ambos os documentos são bastante aproximados, já que a metodologia usada é igual. Pela análise da Tabela 6.13 pode-se verificar que o controlo da abertura de fendas respeita os limites impostos.

Tabela 6.13: Resultados obtidos para o controlo da fendilhação em SLS

Fendas (mm)	Combinações Quase permanentes		Combinações Raras	
	Largura	Largura máxima	Largura	Largura máxima
<i>fib</i>	0,15	0,30	0,27	0,30
<i>ACI</i>	-	-	-	-
<i>CNR</i>	0,16	0,30	0,25	0,30
Legenda:				
		- Verifica os limites		- Não verifica os limites

Dos três documentos aplicados pode-se concluir que o proposto pelo CNR é o mais conservativo e mais dispendioso, pois resulta numa solução com maior quantidade de laminado e menor momento resistente, sendo o ganho de resistência após reforço de 26,9%. O documento menos conservativo é o da *fib*, já que se conseguem bons ganhos de resistência em termos de momento flector com a menor quantidade de laminado e o menor custo em comparação com as outras soluções obtidas. Aqui o ganho de resistência após reforço foi de 33,9%. Por fim, a solução obtida pelo ACI é aquela que apresenta um maior ganho de resistência em termos de momento flector, 41,8%.

#### 6.4. Reforço ao corte

À semelhança do que foi dito em 6.3, o aumento da sobrecarga na viga teórica na ordem das quatro vezes a sobrecarga inicial, levou à existência da necessidade do seu reforço ao corte. O tipo de fibras adoptado para este reforço é o mesmo que foi usado no reforço à flexão, fibras de carbono, mas optou-se por aplicar mantas de CFRP unidireccionais em vez de laminados.

Como se refere no Capítulo 4, existem várias formas de aplicar o reforço ao corte, tendo-se optado neste trabalho pela aplicação do reforço em três faces do elemento (nas faces laterais e na base.). Uma vez que as mantas de CFRP adoptadas são unidireccionais, foi imposto que a orientação das fibras seja sempre perpendicular ao eixo da viga para que se consiga obter a máxima mobilização de resistência, ou seja, para que se obtenha a máxima eficácia do reforço. A Figura 6.12 representa a correlação do nível de tensão com a variação da orientação das fibras em relação ao eixo da viga.



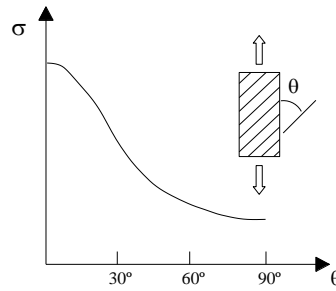


Figura 6.12: Nível de tensão v.s. direcção principal das fibras.

#### 6.4.1. Documento da fib (fib, 2001)

##### 6.4.1.1. Bases de cálculo

Tal como no reforço à flexão, também no corte o reforço é calculado em relação aos estados limites últimos de utilização. Para tal, é usada a combinação fundamental de acções dada pelo EC2.

No que concerne aos estados limites de serviço, o reforço ao corte, não tem de verificar qualquer imposição.

Todas as leis de comportamento do material FRP enunciadas em 6.3.2.1 são válidas e aplicáveis ao reforço ao corte.

A extensão efectiva do FRP,  $\varepsilon_{f,e}$ , depende da forma do reforço adoptada e do tipo de fibra. Como se convencionou para este trabalho que o reforço seria aplicado em três faces do elemento, a extensão efectiva é dada pelo menor dos valores entre,

$$\varepsilon_{f,e} = \text{mínimo} \left[ 0,65 \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,56} \times 10^{-3} ; 0,17 \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (6.81)$$

Onde,  $f_{cm}$  é o valor médio da resistência à compressão do betão em MPa;  $E_{fu}$  é o valor último do módulo de elasticidade do FRP em GPa;  $\rho_f$  é a percentagem de reforço FRP; e  $\varepsilon_{fu}$  é a extensão última do FRP. Conhecida a extensão efectiva, é possível determinar o valor característico da extensão efectiva do FRP,  $\varepsilon_{fk,e}$ , multiplicando a extensão efectiva por um factor de redução,  $k$ , que normalmente assume o valor de 0,8.

$$\varepsilon_{fk,e} = k \varepsilon_{f,e} \quad (6.82)$$

Devido à falta de informação acerca da determinação desta extensão, a aproximação anterior é considerada como válida.

O valor de cálculo da extensão efectiva do FRP,  $\varepsilon_{fd,e}$ , pode então ser obtido pela minoração do valor característico da extensão efectiva FRP por um coeficiente de segurança,  $\gamma_f$ . Este coeficiente de segurança assume os valores dados na Tabela 6.2 consoante o tipo de fibra.

No entanto, alguns autores propõem que o valor característico da extensão efectiva seja limitado a 0,006 para que se mantenha a integridade do betão e a correcta mobilização da interligação dos agregados.

#### 6.4.1.2. Estados limites últimos

A metodologia de cálculo adoptada pela *fib* baseia-se no modelo proposto por Triantafillou e Täljsten (*fib*, 2001), o qual propõem que o reforço FRP aplicado externamente deva ser tratado de forma análoga ao aço interno de reforço, considerando que o FRP apenas resiste a esforços cuja direcção coincida com a direcção principal das fibras do sistema de reforço. Então, a resistência ao corte do elemento reforçado,  $V_{Rd}$ , pode ser calculada de acordo com o EC2,

$$V_{Rd} = \text{minimo}(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (6.83)$$

Onde,  $V_{Rd2}$  é o esforço transversal resistente máximo;  $V_{cd}$  é a contribuição do betão para a resistência de cálculo ao corte;  $V_{wd}$  é a contribuição da armadura para a resistência de cálculo ao corte; e  $V_{fd}$  é a contribuição do FRP para a resistência do elemento ao corte. A contribuição do FRP é obtida pela expressão,

$$V_{fd} = 0,9 \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \alpha_e) \sin \alpha \quad (6.84)$$

Onde,  $\varepsilon_{fd,e}$  é a extensão efectiva de cálculo;  $E_{fu}$  é o valor último do módulo de elasticidade na direcção das fibras;  $b_w$  é a largura mínima da secção transversal;  $d$  é a altura útil da secção;  $\theta$  é o ângulo que as fendas diagonais fazem em relação ao eixo do elemento, normalmente assume-se 45°;  $\alpha_e$  é o ângulo que a direcção principal das fibras faz em relação ao eixo do elemento; e  $\rho_f$  é a percentagem de reforço FRP, que para reforços contínuos colados ao longo do elemento é dado por  $2t_f \sin \alpha_e / b_w$ , sendo  $t_f$  a espessura do reforço.

Embora o aumento de esforço no elemento implique o seu reforço ao corte, não existe a necessidade de efectuar este reforço ao longo de todo o elemento. Assim, para o caso em estudo, o comprimento a reforçar a partir dos apoios, é determinado através do sistema de equações de esforço transversal (equação (6.85) e da confrontação do diagrama de esforço

transverso com a respectiva distribuição de estribos (Figura 6.13 e Figura 6.1). Após encontrada a zona onde será feita a dispensa do reforço,  $x$ , é necessário verificar se a armadura de esforço transverso dessa zona resiste ao esforço transverso,  $V$ . Caso não resista, terá novamente de se encontrar um novo  $x$  para fazer a dispensa de armadura.

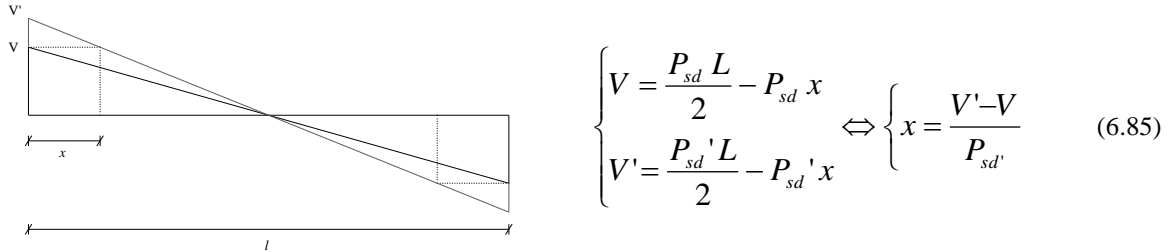


Figura 6.13: Diagrama de esforço transverso.

Na equação (6.85),  $V$  é o esforço de corte no elemento antes do acréscimo de esforços;  $V'$  é o esforço de corte no elemento com o respectivo acréscimo;  $P_{sd}$  é a carga inicial actuante no elemento;  $P_{sd}'$  é a carga actuante com o respectivo acréscimo;  $L$  é o comprimento do elemento; e  $x$  é a distância do apoio a partir da qual se dispensa o reforço ao corte.

#### 6.4.2. Documento do ACI (ACI 440.2R-02, 2002)

##### 6.4.2.1. Bases de cálculo

O reforço ao corte, à semelhança do exposto para a norma *fib*, é calculado para os estados limites últimos de utilização. Para tal, devem ser usadas as mesmas combinações de acções adoptadas no reforço à flexão e que são dadas pela guideline ACI 318-05, (2004). Os factores de redução de resistência a empregar são também definidos nesta guideline.

Também neste documento, no que respeita a SLS, não é proposta nenhuma verificação ao reforço obtido em ULS.

No que respeita às propriedades do material de reforço FRP, as formulações dadas em 6.3.3.1 são válidas e aplicáveis ao reforço ao corte. A extensão efectiva no FRP,  $\varepsilon_{fe}$ , é a máxima extensão que o FRP consegue suportar para as cargas em ULS e depende da configuração do reforço adoptada. Tendo sido imposto que para o caso em estudo o reforço será aplicado em três faces, a extensão efectiva no FRP é dada por,

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (6.86)$$

Onde,  $k_v$  é um coeficiente de redução de colagem, de forma a ter em conta a delaminação do betão devido à perda da ligação entre agregados; e  $\varepsilon_{fu}$  é o valor máximo da extensão de cálculo no FRP e é dado pela equação (6.50). Nos casos onde a extensão efectiva não cumpre a limitação imposta de 0,004, a guideline impõe que sejam aplicadas ancoragens nas extremidades do reforço como forma de evitar a descolagem e absorver as tensões.

Por sua vez, o coeficiente de redução de colagem é função da resistência do betão, da configuração de reforço usada e da rigidez do sistema FRP. Então,  $k_v$  é dado por,

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (6.87)$$

Onde,  $k_1$  e  $k_2$  são coeficientes de modificação; e  $L_e$  é o comprimento de colagem activo, que indica o comprimento para o qual as tensões de colagem se mantêm. Este comprimento é dado por,

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0,58}} \quad (6.88)$$

Onde,  $n$  é o numero de camadas de reforço;  $t_f$  é a espessura de uma camada; e  $E_f$  é o valor de cálculo do módulo de elasticidade do FRP.

Os coeficientes de modificação  $k_1$  e  $k_2$  têm como finalidade a introdução da influência, de forma indirecta, das características da resistência do betão e da configuração de reforço usada, respectivamente. Estes factores são então dados por,

$$k_1 = \left( \frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (6.89)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \text{ para reforço em três faces} \quad (6.90)$$

Onde,  $f'_c$  é a resistência do betão à compressão; e  $d_f$  é a altura livre da viga onde irá ser colado o reforço.

#### 6.4.2.2. Estados limites últimos

O cálculo do reforço ao corte em ULS deve verificar a condição,

$$\phi V_n \geq V_u \quad (6.91)$$

$V_u$  é o esforço transversal actuante no elemento; e  $V_n$  representa o esforço transversal resistente do elemento reforçado. Manda a guideline que esta resistência seja afectada de um factor de redução de resistência,  $\phi$ , que é dado na guideline ACI 318-05, (2004). A resistência ao corte do elemento reforçado é dada pela soma das contribuições do reforço FRP,  $V_f$ , com a contribuição do aço,  $V_s$ , e com a contribuição do betão,  $V_c$ .

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (6.92)$$

A guideline recomenda ainda a utilização de um outro factor de redução de resistência associado à contribuição do reforço FRP,  $\psi_f$ , e que esta relacionado com a configuração do reforço usada. Consoante a configuração, na Tabela 6.14 encontram-se os valores para  $\psi_f$ .

Tabela 6.14: Factor de redução de resistência associado ao reforço FRP (adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).

	$\psi_f$
Elementos reforçados nas quatro faces	0,95
Elementos reforçados em duas ou três faces	0,85

A determinação da contribuição do reforço FRP para a resistência ao corte do elemento reforçado, depende da orientação das fibras do reforço e é feita assumindo a secção fendilhada.  $V_f$  é então dada por,

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (6.93)$$

Onde,

$$A_{fv} = 2n t_f w_f \quad (6.94)$$

Na equação anterior,  $n$  é o número de camadas de reforço;  $t_f$  é a espessura de uma camada; e  $w_f$  é a largura da tira de reforço de acordo com a Figura 6.14. As variáveis da equação (6.93) encontram-se identificadas na Figura 6.14, onde  $\alpha$  é o ângulo que a direcção principal das fibras faz com o eixo da peça;  $d_f$  é a altura livre na face do elemento, onde será colado o reforço;  $s_f$  é a distância entre os pontos médios de dois reforços consecutivos; e  $f_{fe}$  é a tensão efectiva no reforço FRP, de acordo com a equação,

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (6.95)$$

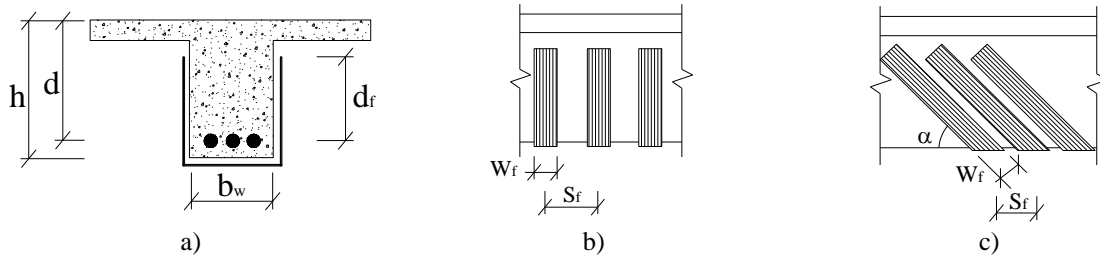


Figura 6.14: Esquema representativo das variáveis usadas no reforço ao corte  
(adaptado de ACI 440.2R-02, 2002).

Dado que foi admitido que o reforço será feito com mantas de CFRP, a distância  $s_f$  é determinada assumindo que o reforço na viga é feito com recurso a dois grandes estribos de CFRP, em que cada um abrange metade da viga, sendo  $w_f = L/2$ . Desta forma,  $s_f$  vale também  $L/2$ . Fazendo a substituição destas duas variáveis na equação (6.93), resulta a fórmula simplificada que permite a determinação da contribuição do FRP para o reforço ao corte com mantas FRP,

$$V_f = 2nt_f f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f \quad (6.96)$$

Tal como dito no documento da *fib*, o reforço não é necessário ao longo de todo o elemento. A distância à partir do apoio na qual se faz a dispensa de reforço é calculada da mesma forma que em 6.4.1.2.

#### 6.4.3. Documento do CNR (CNR, 2004)

##### 6.4.3.1. Bases de cálculo

Tal como para os documentos da *fib* e do ACI, a verificação do cálculo do reforço ao corte é apenas feita em relação aos ULS. Para tal, é usada a combinação fundamental de acções dada pelo EC2.

Os pressupostos assumidos em 6.3.4.1 e 6.3.4.3 para as propriedades do FRP, são válidos para o reforço ao corte.

Para o cálculo do reforço ao corte, tal como nos outros documentos em análise, é necessário determinar a resistência efectiva de cálculo do FRP,  $f_{fed}$ . Para tal, o documento do CNR propõe uma metodologia simplificada que tem em linha de conta o efeito da concentração de tensões entre o betão e o FRP, junto a fendas de corte. Sendo o reforço aplicado em três faces do elemento, a resistência efectiva de cálculo é dada por,

$$f_{fed} = f_{fd} \left[ 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_e \sin \beta}{\min\{0,9d; h_w\}} \right] \quad (6.97)$$

Onde,  $l_e$  é o comprimento óptimo de colagem e é dado pela equação (6.78);  $\beta$  é o ângulo que a direcção principal das fibras faz com o eixo do elemento;  $d$  é a altura útil da secção;  $h_w$  é a altura livre da secção onde é aplicado o reforço; e  $f_{fd}$  é a tensão última de cálculo para a rotura por descolamento das extremidades do reforço. A tensão  $f_{fd}$  é dada por,

$$f_{fd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \sqrt{\gamma_c}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fk}}{t_f}} \quad (6.98)$$

As variáveis da equação anterior estão definidas na equação (6.75).

#### 6.4.3.2. Estados limites últimos

À semelhança do que é proposto pelos outros dois documentos, o reforço ao corte tem de verificar a condição,

$$V_{Rd} \geq V_{Sd} \quad (6.99)$$

Onde,  $V_{Sd}$  é o esforço transversal actuante; e  $V_{Rd}$  é o esforço transversal resistente do elemento reforçado. A capacidade resistente da secção reforçada é dada pela condição,

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}; V_{Rd,max} \} \quad (6.100)$$

Na equação anterior,  $V_{Rd,ct}$  e  $V_{Rd,s}$  representam a contribuição do betão e do aço para a resistência ao corte, respectivamente;  $V_{Rd,f}$  a contribuição do reforço FRP para a resistência ao corte; e  $V_{Rd,max}$  o esforço transversal resistente máximo da secção. Na equação (6.100),  $V_{Rd,ct}$ ,  $V_{Rd,s}$  e  $V_{Rd,max}$  são determinados de acordo com o EC2.

Para elementos de secção rectangular e cujo reforço é feito por colagem nas faces, a contribuição do reforço FRP para a resistência ao corte,  $V_{Rd,f}$ , é dada por,

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} 0,9 d f_{fed} 2 t_f (\cot \theta + \cot \beta) \frac{w_f}{p_f} \quad (6.101)$$

As variáveis da equação anterior encontram-se identificadas na Figura 6.15, onde,  $\gamma_{Rd}$  é um coeficiente parcial de segurança que vale 1,20;  $d$  é a altura útil da secção;  $f_{fed}$  é a resistência efectiva de cálculo;  $t_f$  é a espessura do reforço;  $\theta$  é o ângulo que as fendas de corte fazem com o eixo do elemento;  $\beta$  é o ângulo que a direcção principal das fibras faz com o eixo do elemento;  $w_f$  e  $p_f$  são a dimensão e o espaçamento do reforço, respectivamente.



Figura 6.15: Esquema representativo das variáveis usadas no reforço ao corte (adaptado de CNR, 2004).

Também para este documento se aplica a simplificação efectuada para a proposta do ACI, onde se considera que a distância  $p_f$  é determinada assumindo que o reforço na viga é feito com recurso a dois grandes estribos de CFRP, em que cada um abrange metade da viga, sendo  $w_f = L/2$ . Desta forma,  $p_f$  vale também  $L/2$ .

À semelhança do considerado para o documento da *fib* e do ACI, o reforço não é necessário ao longo de todo o elemento. A distância à partir do apoio na qual se faz a dispensa de reforço é calculada da mesma forma que em 6.4.1.2.

#### 6.4.4. Apresentação de resultados

Para o reforço ao corte do elemento teórico apresentado em 6.2 aplicando os documentos da *fib*, do ACI e do CNR em análise neste trabalho, foram considerados os esforços actuantes indicados na Tabela 6.15. Os valores de esforço transversal apresentados referem-se à secção mais solicitada (junto aos apoios) e variam consoante a norma aplicada devido às combinações de acções consideradas para cada uma. Note-se que a sobrecarga a que a viga irá ser sujeita é de  $8 \text{ kN/m}^2$ .

Tabela 6.15: Esforço transversal actuante em ULS na viga a reforçar.

Esforço transversal actuante – $V_{sd}$ (kN)	<i>fib</i>	ACI	CNR
$V'$	260,5	254,6	260,5

O reforço ao corte do elemento teórico foi efectuado com recurso a mantas de carbono – CFRP. Tal como no reforço à flexão, também aqui foi adoptado sempre o mesmo tipo de manta para que a comparação de resultados se torne mais fácil. As principais propriedades da manta usada encontram-se na Tabela 6.16.

Tabela 6.16: Características principais da manta de CFRP.

	Largura $b_f$ (mm)	Espessura $t_f$ (mm)	Valor característico da resistência à tracção $f_{fk,0.05}$ (GPa)	Alongamento à rotura $\varepsilon_{fuk}$ (%)	Módulo elasticidade $E_f$ (GPa)
Manta CFRP	300	1	0,35	18	28



A configuração do reforço adoptada para os três documentos passa pela sua aplicação em três faces (base e laterais), sendo a direcção principal das fibras perpendicular ao eixo do elemento ( $90^\circ$ ). A altura livre nas laterais do elemento onde cola o reforço foi admitida igual à altura total de secção. Para a orientação das fendas provocadas pelo esforço transversal foi admitido que estas fariam um ângulo de  $45^\circ$  com o eixo do elemento.

Para os três documentos, a contribuição do betão e do aço para a resistência ao esforço transversal é determinada segundo o EC2, resultando os valores da Tabela 6.17.

Tabela 6.17: Resistência da secção ao esforço transversal antes do reforço.

<i>Documento</i>	<i>Contribuição do betão (kN)</i>	<i>Contribuição do aço (kN)</i>	<i>Esforço resistente máximo (kN)</i>
<i>fib</i>	62,4	162,3	376,9
<i>ACI</i>	93,8	186,6	-
<i>CNR</i>	62,4	162,3	376,9

Dos valores da tabela anterior, pode-se constatar que embora estes sejam obtidos segundo o EC2, os valores determinados para o documento do ACI são superiores aos dos outros dois documentos. Esta discrepância deve-se ao facto dos valores de resistência do betão e do aço usados serem valores característicos e não de cálculo. Estes valores serão minorados aquando da determinação da capacidade resistente do conjunto.

Com o reforço do elemento, os ganhos de resistência que se conseguem obter segundo os três documentos são os dados na Tabela 6.18.

Tabela 6.18: Capacidade resistente da secção após o reforço.

<i>Documento</i>	<i>Número de camadas de reforço</i>	<i>Contribuição do reforço FRP (kN)</i>	<i>Capacidade resistente do conjunto (kN)</i>
<i>fib</i>	1	80,8	305,5
<i>ACI</i>	1	90,4	278,0
<i>CNR</i>	1	56,1	280,8

Em todas as soluções de reforço obtidas, apenas é necessária uma camada de manta de FRP. Olhando para a contribuição do reforço FRP pode-se verificar que a solução do CNR é mais conservativa já que o nível de tensão no FRP é o mais baixo quando comparado com as outras soluções. Por sua vez, a solução do ACI é a menos conservativa, pois é a que apresenta maior nível de tensão no FRP.

Atentando agora para a capacidade resistente do conjunto, pode-se verificar que as soluções obtidas pelo ACI e pelo CNR resultam em resistências idênticas. Pode-se então considerar que o seu grau de conservadorismo é idêntico. Ainda em relação à solução do

ACI, a discrepância existente entre a elevada contribuição do FRP e a baixa resistência do conjunto reforçado é devida ao factor de redução de resistência aplicado,  $\phi$ . A solução obtida pela *fib* é a menos conservativa, resultando numa maior resistência do elemento reforçado.

O documento do ACI propõe a limitação das extensões no FRP a  $\varepsilon_{fe} \leq 0,004$ , a qual não é cumprida. Desta forma é necessário aplicar ancoragens mecânicas nas extremidades do reforço. Segundo os outros dois documentos não são necessárias estas ancoragens.

Como o reforço não é necessário em todo o elemento, o comprimento de secção a reforçar a partir do apoio é de cerca de 1,10 m, embora estes valores não sejam exactamente iguais para os três documentos.

### **6.5. Apresentação do modelo teórico do pilar para reforço à flexão e confinamento**

As metodologias de cálculo do reforço de pilares propostas por cada norma em análise foram aplicadas a um modelo teórico de pilar.

O pilar estudado faz parte de um edifício situado em Évora e que foi modelado com recurso ao programa SAP 2000. É um edifício regular em planta e em altura, constituído por 5 pisos, cada um com 3,20 m de pé-direito. O edifício é constituído por uma estrutura reticulada de betão armado com lajes aligeiradas pré-fabricadas e armadas numa só direcção. A direcção de amarração das lajes é alternada entre panos de laje e entre pisos, como se mostra na Figura 6.16 a). As vigas do edifício são iguais à viga teórica apresentada em 6.2, bem como as lajes aligeiradas. O terraço do edifício é não acessível e possui uma carga permanente distribuída de 4 kN/m<sup>2</sup> correspondente à betonilha de regularização, à impermeabilização, ao isolamento e à brita de acabamento. Para efeitos de cálculo também foi considerada a acção do vento calculada segundo o RSA, (2004) para a zona do edifício.

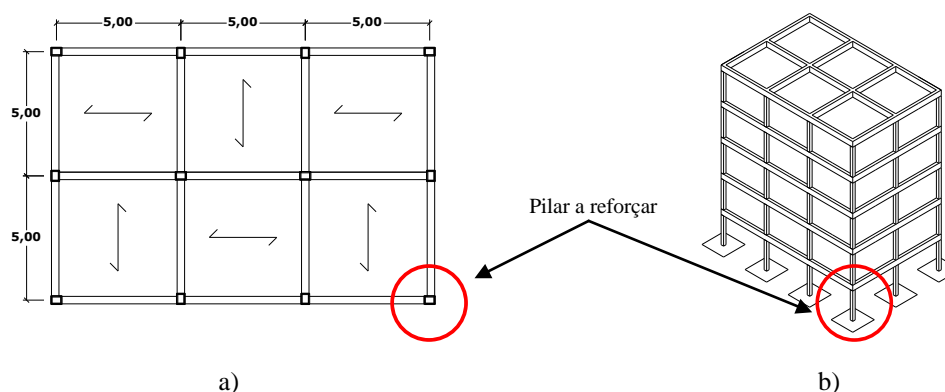


Figura 6.16: a) - Planta do edifício e amarração das lajes; b) - Esquema do edifício.

O pilar estudado foi um pilar de canto, tendo sido dimensionado com recurso aos esforços obtidos da modelação. Do dimensionamento resultou um pilar com secção de 0,3x0,4 armado com 8 $\phi$ 12, com estribos em  $\phi$ 6//0,200 e  $\phi$ 6//0,100 em secções localizadas (Figura 6.17).

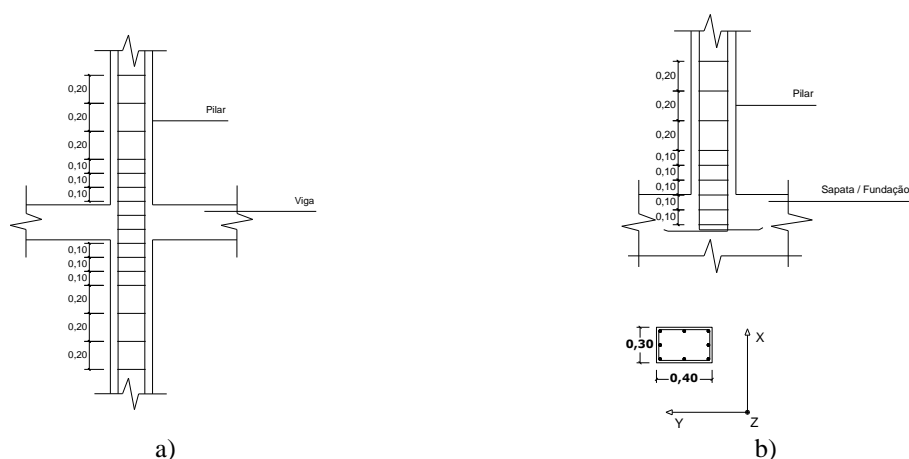


Figura 6.17: Pormenor das armaduras do pilar: a) - Zona das vigas; b) - Zona da fundação.

O pilar teórico cumpre todos os limites impostos pelo EC2 no que respeita a estados limites últimos (ULS) e estados limites de utilização (SLS).

Tendo em conta a localização do edifício, foi inserido um espectro de resposta de um sismo no programa SAP2000 determinado segundo o EC8, correspondendo ao um sismo afastado, dado ser este tipo de sismo que mais condicionou a resposta da estrutura. Foi das acções introduzidas pelo sismo que resultou a necessidade de reforço do pilar. O tramo do pilar estudado foi o que se situa entre a fundação e o primeiro piso, tendo sido denominado de tramo A.

## 6.6. Reforço por confinamento

A necessidade de reforço do pilar teórico surgiu devido ao edifício onde este se insere não ter sido calculado ao sismo, sendo então necessário proceder ao seu reforço por forma a que este resista à solicitação de um eventual sismo.

O reforço por confinamento foi feito com mantas de carbono (CFRP), tendo sido adoptado o mesmo tipo de manta para os três documentos em análise.

### 6.6.1. Documento da fib (fib, 2001)

Tal como já se referiu no Capítulo 4, o reforço de pilares por confinamento aplica-se, essencialmente, a elementos em compressão tendo como finalidades principais o aumento da sua capacidade de carga e o aumento de ductilidade e consequentemente o reforço a acções sísmicas. Quando a intervenção é devida a problemas sísmicos, o princípio do reforço prende-se, normalmente, com o aumento da pressão de confinamento do elemento na zona de formação de potenciais rótulas plásticas ou em todo o elemento. Para além do exposto, o confinamento previne o descolamento e destacamento do betão superficial dos elementos, proporciona um suporte lateral ao aço de reforço longitudinal e aumenta a capacidade resistente e de deformação do betão.

As propriedades dos materiais que constituem os sistemas FRP a aplicar no confinamento são obtidas da mesma forma que no reforço à flexão, pelo que o disposto anteriormente no ponto 6.3.2.1. é aplicável às propriedades usadas no reforço por confinamento.

Em elementos confinados, por oposição ao aço e após cedência deste, o FRP exerce uma pressão de confinamento crescente com comportamento elástico até à rotura. Assim, desta forma é possível continuar o aumento de carga no pilar, suportada pela pressão de confinamento constante do aço e pela pressão de confinamento crescente do FRP. Note-se que a pressão de confinamento é tanto maior quanto maior for a dilatação lateral do betão. A resistência última do betão confinado está directamente relacionada com a tensão de rotura do reforço FRP de confinamento do elemento.

#### *Modelo de tensão extensão do betão confinado*

O modelo adoptado nos fundamentos de cálculo da norma em análise, baseia-se no cálculo incremental iterativo de forma a ter em conta a crescente acção de confinamento. Este

modelo é aplicável a elementos com carregamentos cíclicos e expressa a extensão circunferencial em função da tensão axial. Embora este modelo adoptado pela norma seja dos mais complexos de calcular, é também, dos mais versáteis e precisos. Sendo assim, passa-se a enunciar a formulação exacta do modelo para pilares circulares, em estado limite último ULS.

A pressão última de confinamento,  $f_l$ , é dada por,

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j f_j = \frac{2t_j f_j}{d_j} \quad (6.102)$$

Onde,  $t_j$  é a espessura do FRP;  $d_j$  é o diâmetro da secção; e  $f_j$  é a resistência última do encamisamento de FRP.

Os parâmetros do modelo de confinamento dados pela pressão última de confinamento são,

$$f_{cc} = f_{co} \left( 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1,254 \right) \quad (6.103)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (6.104)$$

Onde,  $f_{cc}$  é a resistência do betão confinado;  $\varepsilon_{cc}$  é a extensão de compressão para o pico de resistência de confinamento  $f_{cc}$ ;  $f_{co}$  é a valor de cálculo da resistência do betão não confinado à compressão; e  $\varepsilon_{co}$  é a extensão do betão não confinado para o pico de tensão.

O módulo de elasticidade último secante,  $E_{\text{sec},u}$ , é dado por,

$$E_{\text{sec},u} = \frac{E_c}{1 + 2\beta_p \varepsilon_{ju}} = \frac{E_c}{1 + 2\beta_p \frac{f_j}{E_j}} \quad (6.105)$$

$$\beta_p = \frac{5700}{\sqrt{|f_{co}|}} - 500 \quad (6.106)$$

Onde,  $E_c$  é o módulo de elasticidade do betão;  $E_j$  é o módulo de elasticidade do encamisamento FRP; e  $\beta_p$  é uma propriedade do betão.

Sendo assim, a extensão última,  $\varepsilon_{cu}$ , e a tensão última,  $f_{cu}$ , são dadas por,

$$f_{cu} = E_{\text{sec},u} \varepsilon_{cu} \quad (6.107)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} \left[ \frac{E_{cc} (E_c - E_{\text{sec},u})}{E_{\text{sec},u} (E_c - E_{cc})} \right]^{1 - E_{cc}/E_c} \quad \text{com} \quad E_{cc} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (6.108)$$

Substituindo as equações (6.105) e (6.106), nas equações anteriores obtém-se,

$$f_{cu} = \frac{E_c \varepsilon_{cu}}{1 + 2\beta_p \varepsilon_{ju}} \quad (6.109)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} \left( \frac{2\beta_p \varepsilon_{ju} E_{cc}}{E_c - E_{cc}} \right)^{1 - E_{cc}/E_c} \quad (6.110)$$

A norma para além deste método mais exacto e mais complexo, apresenta outros dois que são baseados em aproximações, os quais não serão aqui referidos.

### *Confinamento de elementos rectangulares*

A forma de efectuar o confinamento depende da geometria do elemento, sendo que para elementos circulares o encamisamento é feito envolvendo o pilar ao longo de toda a sua superfície ou aplicando tiras em espaçadas entre si. Já para os elementos rectangulares, o encamisamento é feito arredondando os cantos (15 a 25 mm de raio) e aplicando então o material de reforço cobrindo toda a superfície do elemento ou sob forma de tiras espaçadas. O confinamento de elementos rectangulares não é tão eficiente como o confinamento de elementos circulares devido à geometria e à necessidade de maiores espessuras de reforço para limitar as deformações dos cantos do elemento.

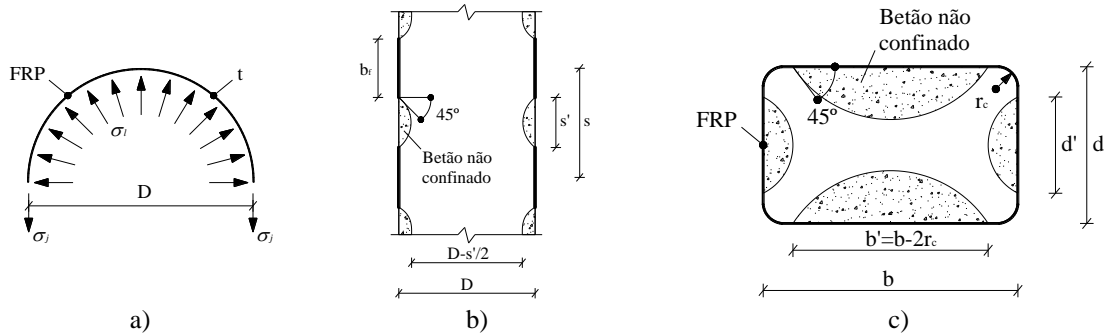


Figura 6.18: Pressão de confinamento exercida pelo FRP e características da secção (adaptado de *fib*, 2001).

A pressão de confinamento lateral,  $\sigma_l$ , pode ser calculada a partir da tensão instalada no encamisamento de FRP,  $\sigma_j$ .

Então,

$$\sigma_l = K_{conf} \sigma_j \quad (6.111)$$

$$K_{conf} = \frac{1}{2} \rho_j E_j \quad (6.112)$$

Onde,  $K_{conf}$  é a rigidez do confinamento FRP;  $\varepsilon_l$  é a extensão circunferencial do betão, considerada igual à extensão no encamisamento de FRP,  $\varepsilon_j$ ;  $\rho_j$  é a relação volumétrica de encamisamento FRP; e  $E_j$  é o módulo de elasticidade do encamisamento de FRP.

A pressão máxima de confinamento lateral,  $f_l$ , é dada por,

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju} \quad (6.113)$$

Onde,  $\varepsilon_{ju}$  é a extensão de rotura do encamisamento FRP.

Sendo a secção estudada de forma rectangular, as equações (6.111) e (6.112) sofreram uma ligeira alteração. De forma semelhante ao elementos de secção circular, as pressões máximas de confinamento lateral provocadas pelo encamisamento FRP em secções quadradas ou rectangulares são dadas por,

$$\begin{aligned} \sigma_{lx} &= K_{conf,x} \varepsilon_{ju} & \sigma_{ly} &= K_{conf,y} \varepsilon_{ju} \\ K_{conf,x} &= \rho_{jx} k_e E_j & K_{conf,y} &= \rho_{jy} k_e E_j \\ \rho_{jx} &= \frac{2b_f t_j}{s d} & \rho_{jy} &= \frac{2b_f t_j}{s d} \end{aligned} \quad (6.114)$$

Onde,  $\rho_{jx}$  e  $\rho_{jy}$  representam a relação volumétrica de reforço por confinamento na direcção  $x$  e  $y$ , respectivamente.

O coeficiente de eficácia de confinamento  $k_e$  é dado por,

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 A_g \left( 1 - \frac{A_s}{A_g} \right)} \quad (6.115)$$

Onde,  $b'$  e  $d'$  são as dimensões das faces correspondentes ao betão não confinado,  $A_g$  é a área da secção de betão; e  $A_s$  é a área total de aço de reforço longitudinal.

Substituindo na equação (6.103) o parâmetro  $f_l$  pelo mínimo dos valores  $\sigma_{lx}$  e  $\sigma_{ly}$ , é possível obter a resistência do betão confinado.

### 6.6.2. Documento do ACI (ACI 440.2R-02, 2002)

De acordo com a guideline do ACI, os sistemas de encamisamento FRP podem ser usados para aumentar a resistência à compressão axial dos elementos de betão, fazendo o

confinamento do elemento com as fibras do FRP orientadas transversalmente ao seu eixo. As fibras poderão ser totalmente perpendiculares ao eixo do elemento ou envoltas neste de forma helicoidal, sendo que qualquer contribuição de fibras alinhadas segundo o eixo da peça deve ser desprezada.

Segundo a norma, a resistência axial de um elemento de betão armado, não esbelto, confinado com um encamisamento de FRP é dada por,

$$\phi P_n = 0,80\phi[0,85\psi_f f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (6.116)$$

Onde,  $f'_{cc}$  é a resistência aparente do betão confinado;  $A_g$  é a área da secção e  $A_{st}$  é a área total do reforço longitudinal.  $\psi_f$  é um factor de redução adicional, cujo valor recomendado pela norma é 0,95. Consultando a ACI 318-05, (2004), pode-se obter o valor do coeficiente de segurança  $\phi$ , que se considera 0,65.

O confinamento permite aumentar a capacidade axial do elemento, através do aumento da resistência do betão à compressão. Então, a resistência aparente do betão confinado,  $f'_{cc}$ , com um encamisamento de FRP pode ser determinada pela equação,

$$f'_{cc} = f'_c \left[ 2,25 \sqrt{1 + 7,9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1,25 \right] \quad (6.117)$$

Onde,  $f'_c$  é a resistência do betão à compressão; e  $f_l$  é a pressão de confinamento do encamisamento FRP.

Segundo a norma, a equação (6.117) foi originalmente desenvolvida para modelos de confinamento por encamisamento com chapas de aço, sendo que o modelo considera uma pressão de confinamento constante correspondente à tensão de cedência do aço. No entanto este modelo mostrou ser aplicável a encamisamentos com FRP. Contudo, a variação da pressão de confinamento deve ser considerada linear, ou seja, um aumento da extensão no encamisamento FRP resulta num aumento proporcional na pressão de confinamento.

A determinação do pico de resistência do betão confinado pode ser feita por uma simples aproximação, substituindo na equação (6.117) o valor da pressão de confinamento do FRP, resultante da extensão efectiva máxima no encamisamento de FRP,

$$f_l = \frac{k_a \rho_f f_{fe}}{2} = \frac{k_a \rho_f \varepsilon_{fe} E_f}{2} \quad (6.118)$$



Onde,  $k_a$  é um factor de eficiência do reforço FRP;  $\rho_f$  é a relação volumétrica de encamisamento FRP;  $\varepsilon_{fe}$  é a extensão efectiva no reforço FRP e  $E_f$  é o módulo de elasticidade do sistema de reforço FRP. A norma impõem que em elementos sujeitos a esforços de compressão e corte, a extensão efectiva no encamisamento FRP seja limitada a,

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu} \quad (6.119)$$

Onde,  $\varepsilon_{fu}$  é a extensão de rotura do reforço FRP

Segundo a norma, em elementos de secção quadrada e rectangular o encamisamento com FRP não aumenta efectivamente a resistência axial, mas sim a ductilidade.

A relação volumétrica de reforço,  $\rho_f$ , necessária na equação (6.117) é dada por,

$$\rho_f = \frac{2nt_f(b+h)}{bh} \quad (6.120)$$

O factor de eficiência do reforço FRP,  $k_a$ , é dado por,

$$k_a = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh \left(1 - \frac{A_{st}}{A_g}\right)} \quad (6.121)$$

Onde,  $b$  e  $h$  são os lados da secção quadrada ou rectangular;  $n$  é o número de camadas de reforço;  $t_f$  é a espessura de uma camada de reforço;  $r$  é o raio dos cantos da secção (mínimo 0,02 m);  $A_{st}$  e  $A_g$  são as áreas de aço longitudinal e de betão, respectivamente.

A norma recomenda, que o esforço de corte seja avaliado com recurso à metodologia presente no capítulo sobre reforço de vigas ao corte (ponto 6.4.2 deste trabalho), de forma a evitar possíveis roturas por corte.

O reforço por encamisamento deve respeitar os estados limites de serviço SLS. Então, para assegurar que não ocorre fendilhação radial devido a deformações plásticas, a norma manda que as tensões não ultrapassem  $0,65f'_c$  no betão e  $0,60f_y$  no aço.

Limitando as tensões no betão, as tensões no encamisamento de FRP estarão automaticamente limitadas.

### 6.6.3. Documento do CNR (CNR, 2004)

De acordo com a norma do CNR, o confinamento de elementos de betão armado permite aumentar o seu desempenho estrutural, nomeadamente a resistência última, a ductilidade e

aumentar a resistência esforços axiais combinados com momentos flectores, quando o reforço FRP possui fibras alinhadas com a direcção axial do elemento.

O confinamento de elementos de betão armado pode ser efectuado com tiras de FRP envoltas sobre o perímetro do elemento de forma contínua ou descontínua. O aumento da capacidade axial e da extensão última do betão confinado com o FRP depende da pressão de confinamento aplicada, que por sua vez depende da secção do elemento e da rigidez do FRP. Em elementos confinados com FRP, ao contrário de elementos confinados com aço, a pressão lateral aumenta linearmente com a expansão lateral do elemento, devido à lei de comportamento do FRP possuir um comportamento linear – elástico até à rotura.

O reforço da capacidade axial de elementos de betão armado é conseguido através do aumento da resistência à compressão do betão confinado. Assim passa-se a explicar estes dois pontos abordados pela norma.

A maneira mais eficaz de se confinar um elemento é aplicando o reforço FRP com as fibras direccionadas ortogonalmente ao eixo do elemento. Também é possível fazer este confinamento instalando o reforço de forma helicoidal no elemento mas, a eficiência deste é inferior ao confinamento ortogonal e deve ser avaliada de forma apropriada. Para elementos de secção rectangular, em que  $b/d > 2$  ou  $\max\{b,d\} > 9000$ , o efeito de confinamento proporcionado pelo FRP deve ser desprezado.

Segundo a norma, o calculo do reforço por confinamento com FRP em estado limite último ULS deve satisfazer a condição,

$$N_{sd} \leq N_{Rcc,d} \quad (6.122)$$

Onde  $N_{sd}$  é o esforço axial de cálculo; e  $N_{Rcc,d}$  é a capacidade axial do elemento, dada por,

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} A_c f_{ccd} + A_s f_{yd} \quad (6.123)$$

Onde,  $\gamma_{Rd}$  é o factor de segurança e que vale 1,10;  $A_c$  é a área da secção de betão armado;  $f_{ccd}$  é a resistência de cálculo do betão confinado;  $A_s$  é a área de aço longitudinal; e  $f_{yd}$  é a tensão de cedência do aço.

Na determinação do esforço axial de cálculo é necessário conhecer a resistência de cálculo do betão confinado,  $f_{ccd}$ , a qual pode ser obtida pela equação,

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} A_c f_{ccd} + A_s f_{yd} \quad \text{com} \quad \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} > 0.05 \quad (6.124)$$

Onde,  $f_{cd}$  é a resistência de cálculo do betão não confinado; e  $f_{l,eff}$  é a pressão efectiva de confinamento lateral.

A pressão efectiva de confinamento lateral,  $f_{l,eff}$ , é obtida a partir do produto da pressão de confinamento lateral,  $f_l$ , por um coeficiente de eficiência,

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{fd,rid} \quad (6.125)$$

$$f_{l,eff} = k_{eff} f_l \quad (6.126)$$

Onde,  $\rho_f$  é a proporção geométrica de reforço e que é função da secção do elemento e da configuração do FRP (encamisamento contínuo ou descontínuo);  $E_f$  é o módulo de elasticidade na direcção das fibras e  $\varepsilon_{fd,rid}$  é a extensão de cálculo reduzida do FRP dada por,

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ \eta_a \varepsilon_{fk} / \gamma_f ; 0,004 \right\} \quad (6.127)$$

Onde,  $\eta_a$  é o factor de conversão ambiental dado na Tabela 6.3; e  $\gamma_f$  é um coeficiente de segurança dado na Tabela 6.5.

O coeficiente de eficiência,  $k_{eff}$ , utilizado no cálculo da pressão efectiva de confinamento lateral é função de um coeficiente de eficiência horizontal,  $k_h$ , que depende da forma da secção do elemento; é função de um coeficiente de eficiência vertical,  $k_v$ , que depende da configuração do FRP; e é função de um coeficiente de eficiência  $k_a$  que depende da forma como as fibras são aplicadas em torno do perímetro do elemento (ortogonalmente ou helicoidalmente).

Para secções circulares o coeficiente de eficiência horizontal é igual a 1 e para secções rectangulares é dado por,

$$k_h = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g} \quad (6.128)$$

Onde,  $b'$  e  $d'$  são as dimensões indicadas na Figura 6.19 b); e  $A_g$  é a área da secção do elemento.

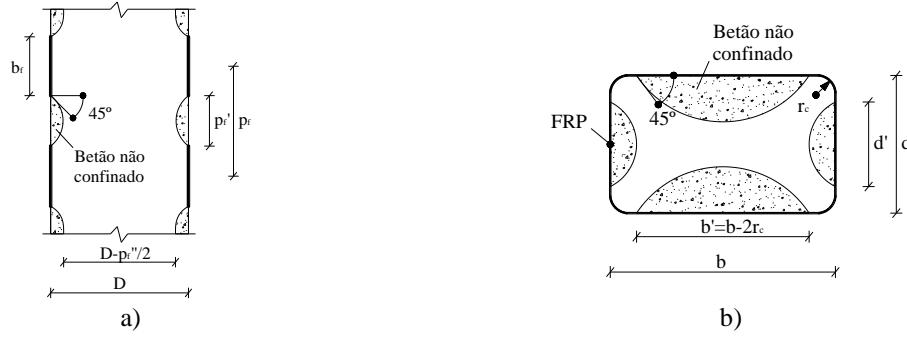


Figura 6.19: Geometria e propriedades da secção confinada (adaptado de CNR, 2004).

O coeficiente de eficiência vertical,  $k_v$ , depende do tipo de configuração do reforço FRP e para reforços por confinamento contínuo,  $k_v=1$ . Para elementos em que o reforço é descontínuo (Figura 6.19 a),  $k_v$  é dado por,

$$k_v = \left( 1 - \frac{p_f'}{2d_{\min}} \right)^2 \quad (6.129)$$

Onde,  $d_{\min}$  é a menor dimensão da secção transversal. O espaçamento máximo admitido para as tiras de reforço deve satisfazer a condição  $p_f' < d_{\min}/2$ .

O coeficiente de eficiência  $k_\alpha$  a ser usado quando o reforço é instalado helicoidalmente, em que as fibras fazem um ângulo  $\alpha_f$  com a secção transversal do elemento, é dado por,

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + (\tan \alpha_f)^2} \quad (6.130)$$

Como já anteriormente dito, o confinamento de elementos de secção rectangular não se traduz em grandes aumentos da capacidade axial. Em secções rectangulares as arestas devem ser arredondas para evitar a concentração de tensões nos cantos da secção, as quais podem levar à rotura do reforço. O raio mínimo deve cumprir  $r_c \geq 0.02$  m.

Na equação (6.125), a proporção geométrica de reforço,  $\rho_f$ , para o caso em que o reforço é aplicado de forma contínua é dada por,

$$\rho_f = \frac{2t_f(b+d)}{(b-d)} \quad (6.131)$$

Onde,  $t_f$  é a espessura do FRP;  $b_f$  é a largura da tira; e  $p_f$  é o espaçamento das tiras.

Para o caso em que o reforço é descontínuo,  $\rho_f$  é dado por,

$$\rho_f = \frac{2t_f(b+d)b_f}{bd p_f} \quad (6.132)$$

## 6.7. Reforço à flexão

O pilar em estudo não foi dimensionado à acção sísmica, tendo por isso a necessidade de ser reforçado. No ponto anterior tratou-se o reforço por confinamento, com o qual se consegue aumentar a ductilidade e a resistência à compressão do betão confinado. Com o aumento da resistência à compressão do betão confinado é possível aumentar, embora ligeiramente, a resistência do elemento à flexão (acção de momentos flectores). Quando este aumento não é o bastante para se conseguir resistir aos momentos flectores que se instalam no elemento, torna-se necessário reforçar à flexão. O pilar em estudo, sendo um pilar de canto, está sujeito a flexão composta desviada ( $N+M_x+M_y$ ). Relativamente aos pilares, os três documentos estudados apenas apontam como medida de reforço o confinamento, para a qual descrevem a metodologia de cálculo e os limites a impor. Relativamente ao reforço dos pilares à flexão os documentos remetem para o capítulo referente ao reforço de vigas à flexão, situação que não é possível nem viável devido às metodologias apresentadas serem propostas para vigas simplesmente apoiadas e sujeitas a flexão simples.

Sendo os três documentos omissos relativamente a esta matéria, tentou-se fazer uma análise simplificada da secção do pilar a fim de se conseguir reforçá-lo à flexão. Para tal recorreu-se ao programa Response 2000 (RSP, 2009) e à decomposição da flexão composta desviada em flexão composta simples segundo a fórmula da interacção de momentos dada pelo EC2,

$$\left(\frac{M_{Edz}}{M_{Rdz}}\right)^a + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{Rdy}}\right)^a \leq 1,0 \quad (6.133)$$

Onde,  $M_{Edz/y}$  é o momento de cálculo em relação ao eixo considerado, incluindo um momento de segunda ordem;  $M_{Rdz/y}$  é o momento resistente na direcção considerada; e  $a$  é um expoente que vale 2 para secções circulares e elípticas e para secções rectangulares vale,

Tabela 6.19: Expoente  $a$  (adaptado de CEN, 2004).

$N_{Ed}/N_{Rd}$	0,1	0,7	1,0
$a$	1,0	1,5	2,0

Na tabela,  $N_{Ed}$  é o valor de cálculo do esforço axial; e  $N_{Rd}$  é o esforço axial resistente do elemento, que é dado por  $N_{Rd}=A_c f_{cd}+A_s f_{yd}$  em que  $A_c$  é a área bruta da secção transversal de betão e  $A_s$  é a área de aço das armaduras longitudinais.

Através do programa de elementos finitos SAP 2000 foi possível obter os esforços axiais e os momentos flectores actuantes no pilar em estudo para um sismo afastado na região de Évora. Com estes esforços e com o programa Response 2000 foi possível, através da equação (6.133), avaliar a necessidade de reforço do pilar e verificar se o reforço proposto era o suficiente. Dado o programa Response 2000 ser um pouco limitado, a modelação do reforço à flexão foi simulada com uma barra de reforço FRP longitudinal aplicada na face pretendida, cujas propriedades dos materiais foram definidas de acordo com o laminado a aplicar. Uma outra simplificação admitida foi terem-se desprezado as extensões iniciais do elemento, já que o programa não permite a sua consideração nos cálculos. As extensões no FRP foram controladas tendo por base as limitações impostas por cada documento na matéria referente ao reforço de vigas à flexão. Os fenómenos de rotura por descolamento das extremidades ou descolamento ao longo do FRP foram desprezados já que por cima dos laminados longitudinais será aplicado o encamisamento de confinamento.

## 6.8. Apresentação de resultados

No reforço do pilar teórico apresentado em 6.5, aplicaram-se as propostas da *fib*, do ACI e do CNR no reforço por confinamento e no reforço por flexão aplicou-se a metodologia simplificada apresentada em 6.7.

Ao longo de todos os cálculos, o referencial usado foi sempre o referencial adoptado no modelo numérico (Figura 6.20).

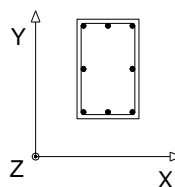


Figura 6.20: Referencial usado nos cálculos.

Da modelação do edifício em SAP 2000 tiram-se os esforços no pilar em análise, esforços esses devidos à acção sísmica, aos quais foram adicionados os efeitos devido às

imperfeições geométricas e às excentricidades de 2ª ordem. Os esforços resultantes actuantes no pilar encontram-se na Tabela 6.20.

Tabela 6.20: Esforços actuantes de cálculo.

Esforços actuantes de cálculo	Combinação Sismo 1/2,5X+0,3/2,5Y		
	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Edy</sub> (kN.m)	M <sub>Edx</sub> (kN.m)
	367,9	56,7	29,6
	Combinação Sismo 1/2,5Y+0,3/2,5X		
	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Edy</sub> (kN.m)	M <sub>Edx</sub> (kN.m)
	368,2	23,4	97,8

Conhecidos os esforços actuantes de cálculo e conhecida a secção e a armadura do pilar, com o auxílio do Response 2000 obtiveram-se os momentos flectores resistentes da secção para o esforço axial actuante de cálculo, os quais se encontram na Tabela 6.21. Considera-se que o esforço axial actuante é igual ao esforço axial resistente.

Tabela 6.21: Esforços resistentes de cálculo da secção.

Esforços resistentes de cálculo	Combinação Sismo 1/2,5X+0,3/2,5Y			
	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Rdy</sub> (kN.m)	M <sub>Rdx</sub> (kN.m)	(M <sub>Edy</sub> /M <sub>Rdy</sub> ) <sup>a</sup> +(M <sub>Edx</sub> /M <sub>Rdx</sub> ) <sup>a</sup>
	367,9	71,9	99,9	1,05
	Combinação Sismo 1/2,5Y+0,3/2,5X			
	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Rdy</sub> (kN.m)	M <sub>Rdx</sub> (kN.m)	(M <sub>Edy</sub> /M <sub>Rdy</sub> ) <sup>a</sup> +(M <sub>Edx</sub> /M <sub>Rdx</sub> ) <sup>a</sup>
	368,2	71,9	99,9	1,28

Legenda:  Verifica  Não verifica

Os esforços resistentes da tabela anterior são iguais para as duas combinações devido ao esforço axial instalado no pilar ser praticamente igual para ambas as combinações. Como se pode verificar pela fórmula da interacção de momentos, o pilar não tem capacidade de resistir à acção sísmica pois o resultado é superior a 1,0.

Com o confinamento da secção e com o consequente aumento da resistência à compressão do betão confinado, recorreu-se novamente ao Response 2000 a fim de se determinar novamente os momentos resistentes para o esforço axial de cálculo e considerando a resistência à compressão do betão confinado. Os resultados encontram-se na Tabela 6.22 e Tabela 6.23.

Tabela 6.22: Resistência de cálculo do betão confinado à compressão.

(Mpa)	fib	ACI	CNR
Resistência de cálculo	15,0	14,2	16,2

Dos três documentos aplicados, é da proposta do CNR que resulta a maior resistência à compressão do betão confinado, sendo portanto a proposta menos conservadora. A

proposta do ACI é que se revela mais conservadora pois o seu resultado é o menor dos três obtidos.

Tabela 6.23: Esforços resistentes de cálculo da secção confinada.

Esforços resistentes de cálculo da seção confinada	Combinação Sismo 1/2,5X+0,3/2,5Y				
	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Rdy</sub> (kN.m)	M <sub>Rdx</sub> (kN.m)	(M <sub>Edy</sub> /M <sub>Rdy</sub> ) <sup>a</sup> +(M <sub>Edx</sub> /M <sub>Rdx</sub> ) <sup>a</sup>	
	<i>fib</i>	367,9	74,4	103,2	1,01
	<i>ACI</i>	367,9	73,3	101,8	1,02
	<i>CNR</i>	367,9	75,9	105,3	0,99
	Combinação Sismo 1/2,5Y+0,3/2,5X				
	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Rdy</sub> (kN.m)	M <sub>Rdx</sub> (kN.m)	(M <sub>Edy</sub> /M <sub>Rdy</sub> ) <sup>a</sup> +(M <sub>Edx</sub> /M <sub>Rdx</sub> ) <sup>a</sup>	
	<i>fib</i>	368,2	74,4	103,2	1,23
	<i>ACI</i>	368,2	73,3	101,8	1,25
	<i>CNR</i>	368,2	75,9	105,3	1,21
Legenda:		Verifica		Não verifica	

A variação dos momentos flectores resistentes é directamente influenciada pela variação da resistência à compressão do betão confinado. Desta forma pode-se verificar que os resultados dos momentos flectores resistentes são mais favoráveis para o documento do CNR e menos favoráveis para o documento do ACI. Segundo o CNR, apenas quando o sismo solicita a estrutura na direcção Y (combinação Sismo 1/2,5Y+0,3/2,5X) é que se torna necessário reforço da secção nesta direcção. Já para os outros dois documentos existe a necessidade de reforçar a secção quando o sismo actua em X ou em Y, sendo que a maior necessidade se verifica para esta última direcção de actuação.

Verificadas as necessidades de reforço do pilar segundo cada documento, optou-se pela aplicação de uma camada de laminado de CFRP colada na em cada face do pilar, consoante a direcção que se pretendia reforçar. As propriedades do laminado usado encontram-se na Tabela 6.24.

Tabela 6.24: Características principais do sistema laminado de CFRP.

	Largura $b_f$ (mm)	Espessura $t_f$ (mm)	Valor característico da resistência à tracção $f_{fk\ 0.05}$ (GPa)	Alongamento à ruptura $\epsilon_{fuk}$ (‰)	Módulo elasticidade $E_f$ (GPa)
Laminado CFRP	60	1,2	2,8	17,0	165

Com o auxílio do programa Response 2000 fez-se a modelação do reforço do pilar por aplicação do laminado de CFRP e considerando a resistência do betão confinado. A partir da modelação foi possível conhecer o aumento da resistência do pilar e perceber, pela fórmula da interacção de momentos, se o reforço era suficiente. Na Tabela 6.23 encontram-se os resultados obtidos do Response 2000 e para cada situação é apresentado um pequeno



esquema onde se identificam por meio de um “X” as faces onde se considerou a aplicação de um laminado.

Tabela 6.25: Esforços resistentes de cálculo da secção confinada e reforçada à flexão.

Combinação Sismo 1/2,5X+0,3/2,5Y								
		$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Rdy}$ (kN.m)	$M_{Rdx}$ (kN.m)	$(M_{Edy}/M_{Rdy})^a + (M_{Edx}/M_{Rdx})^a$	$\epsilon_f$ (‰)	$\epsilon_{fy}$ (‰)	$\epsilon_{fy}$ (‰)
	<i>fib</i>	367,9	94,0	103,2	0,84	8,5	8,1	-
	<i>ACI</i>	367,9	91,9	101,8	0,86	16,2	7,9	-
	<i>CNR</i>	367,9	75,9	105,3	0,99	-	-	-
Combinação Sismo 1/2,5Y+0,3/2,5X								
		$N_{Ed}$ (kN)	$M_{Rdy}$ (kN.m)	$M_{Rdx}$ (kN.m)	$(M_{Edy}/M_{Rdy})^a + (M_{Edx}/M_{Rdx})^a$	$\epsilon_f$ (‰)	$\epsilon_{fy}$ (‰)	$\epsilon_{fy}$ (‰)
	<i>fib</i>	368,2	94,0	129,2	0,97	8,5	8,1	8,1
	<i>ACI</i>	368,2	91,9	126,4	0,99	16,2	7,9	7,9
	<i>CNR</i>	368,2	75,9	133,5	0,99	14,7	-	8,3
Legenda: <span style="background-color: #90EE90; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> <i>Verifica</i> <span style="background-color: #FFB6C1; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> <i>Não verifica</i>								

Pelos resultados obtidos pode-se verificar que para os documentos da *fib* e do *ACI*, a aplicação de uma camada de laminado nas faces no plano em Y são suficientes para verificar a interacção de momentos quando o sismo actua segundo a direcção X. As extensões para os esforços indicados cumprem a limitação imposta pelos documentos. Como já referido anteriormente, para o sismo nesta direcção o confinamento para a proposta do *CNR* consegue conferir a resistência necessária dispensando o reforço à flexão.

Para a solicitação do sismo segundo a direcção Y e para os documentos da *fib* e do *ACI*, é necessária a aplicação de uma camada de laminado nas quatro faces do pilar. Com os quatro laminados consegue-se cumprir a interacção de momentos e as extensões limites. Para o caso da aplicação da proposta do *CNR*, apenas é necessário aplicar reforço nas faces no plano em X, que são os planos mais solicitados quando o sismo actua na direcção Y. Também para este caso é respeitada a extensão limite no FRP.

Das duas direcções de solicitação do sismo, pode-se concluir que a mais condicionante para o pilar é a direcção Y. É desta solicitação que resulta o reforço do pilar e que se traduz num reforço nas quatro faces para as propostas da *fib* e do ACI e reforços nas duas faces dos planos em X para a proposta do CNR.

Quanto às extensões admissíveis no FRP, pode-se verificar que o documento da *fib* é o mais conservador ao contrário do documento do ACI que é o menos conservador.

Como já anteriormente referido, todos os problemas relacionados com descolamentos dos laminados quer nas extremidades quer ao longo do laminado são desprezáveis pois o reforço à flexão será sobreposto pelo confinamento.



## Capítulo 7.

### Análise paramétrica

O dimensionamento e o comportamento de estruturas reforçadas à flexão por colagem exterior de laminados de carbono é influenciado por vários parâmetros, nomeadamente pelo momento reduzido da secção,  $\mu$ , pelo número de camadas de laminado e pela sua disposição espacial. O dimensionamento e a solução resultante são ainda influenciados pelo tipo de documento aplicado. Neste capítulo pretende-se estudar a influência da variação destes parâmetros para uma viga simplesmente apoiada, traduzindo os resultados em gráficos que permitiram uma análise comparativa. Os dados que permitiram esta análise encontram-se no anexo A. Os documentos em análise neste capítulo são os mesmos que foram analisados nos capítulos anteriores. São eles, as propostas feitas pela *fib*, pelo ACI e pelo CNR.

#### 7.1. Disposições gerais

O elemento teórico considerado na análise paramétrica foi uma viga simplesmente apoiada, cujos pressupostos para o seu pré-dimensionamento e para o seu dimensionamento foram os mesmos que se adoptaram para o modelo teórico estudado, e que são dados em 6.2. As cargas consideradas no dimensionamento da viga foram também as usadas no dimensionamento do modelo teórico anteriormente estudado e encontram-se na Tabela 6.1.

Para a análise paramétrica estudaram-se cinco tipos de secções cujos momentos reduzidos variaram de  $\mu=0,05$  até  $\mu=0,25$ . Para todas as secções impôs-se que a maior dimensão fosse o dobro da menor dimensão ( $h \approx 2b$ ).

Tabela 7.1: Momentos reduzidos e respectivas secções.

Momento reduzido - $\mu$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Secção	0,41x0,82	0,33x0,65	0,28x0,57	0,26x0,52	0,24x0,48

Com a variação do momento reduzido, as dimensões da secção e o peso próprio da viga variam. Para esta análise, foi considerado que o peso próprio da viga era constante (ver Tabela 6.1). O momento flector actuante em todas as vigas foi mantido constante e valia  $M_{Sd}=185$  kN.m. O momento flector resistente da viga,  $M_{Rd}$ , foi considerado igual para todas as secções analisadas e valia também  $M_{Rd}=185$  kN.m.

A análise paramétrica foi também efectuada tendo em conta a variação do número de camadas de laminado, para a situação em que estes eram aplicados a par e para a situação em que estes eram aplicados sobrepostos. As propriedades do laminado usado na análise encontram-se na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Características principais do sistema laminado de CFRP.

	Largura $b_f$ (mm)	Espessura $t_f$ (mm)	Valor característico da resistência à tracção $f_{fk\ 0.05}$ (GPa)	Alongamento para dimensionamento $\varepsilon_{fud}$ (‰)	Módulo elasticidade $E_f$ (GPa)
Laminado CFRP	90	1,4	2,5	6,5	210

A notação usada para designar o número de camadas aplicadas deve ser interpretada da seguinte forma: quando se indica “uma camada a par/sobreposta” significa que apenas existe um laminado aplicado; “duas camadas a par/sobrepostas” significa que existem dois laminados aplicados, e assim sucessivamente. A Figura 7.1 ilustra a disposição dos laminados explicando melhor o que se expôs neste parágrafo.



Figura 7.1: Disposição dos laminados: a) Dois laminados sobrepostos; b) Dois laminados a par.

As camadas de laminado aplicadas variam em número de uma a cinco para ambas as situações de aplicação. Note-se que para a situação em que os laminados são colados a par, ou seja justapostos entre si, existem secções cuja dimensão da base é inferior à necessária para a colagem dos mesmos. No entanto, como o objectivo do estudo era perceber a evolução do momento resistente com a variação de alguns parâmetros, esta questão foi desprezada. A análise paramétrica foi feita apenas para estados limites últimos, sendo que não foi feita qualquer verificação aos estados limites de utilização, bem como para

qualquer outra limitação imposta para além dos estados limites últimos. No respeitante à dispensa do laminado de reforço, também não foi avaliada a sua posição.

## 7.2. Reforço por colagem de laminados a par

Neste ponto efectuaram-se três tipos de análise onde se mostra a evolução do momento flector resistente para cada documento em análise, para diferentes camadas de reforço a par e para secções com diferentes momentos reduzidos.

### 7.2.1. Momento flector resistente para os documentos em análise

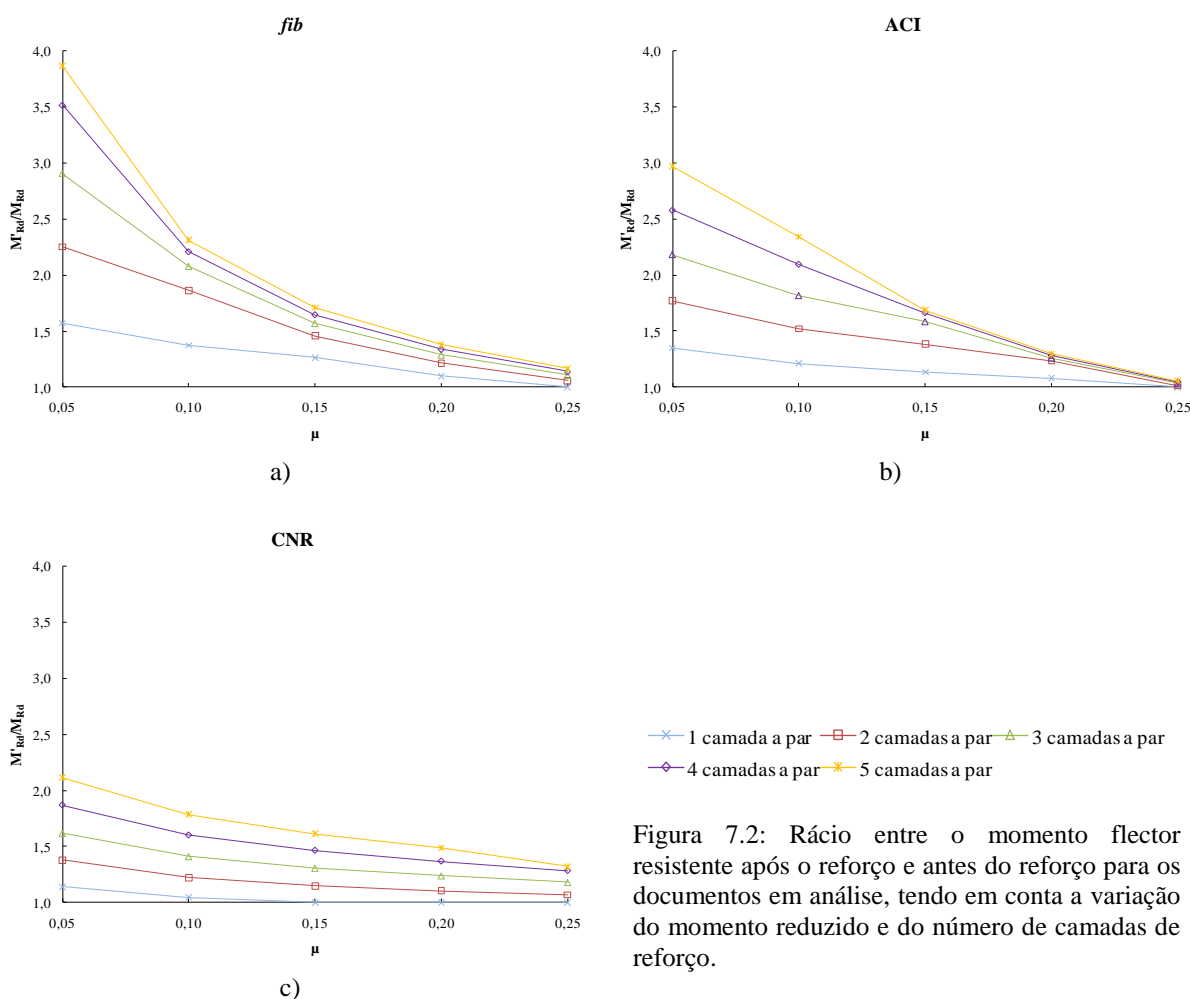


Figura 7.2: Rácio entre o momento flector resistente após o reforço e antes do reforço para os documentos em análise, tendo em conta a variação do momento reduzido e do número de camadas de reforço.

Os gráficos da Figura 7.2 representam o comportamento do rácio entre o momento flector resistente após o reforço,  $M'_{Rd}$ , e o momento flector resistente antes do reforço,  $M_{Rd}$ , para cada secção de momento reduzido,  $\mu$ , e para diferentes camadas de laminado a par.

O gráfico *a)* traduz os resultados obtidos pela aplicação do documento proposto pela *fib*. Pela análise do gráfico pode-se verificar que os maiores valores de  $M'_{Rd}/M_{Rd}$ , independentemente no número de laminados, são obtidos para a secção de menor  $\mu$ . Para valores de  $\mu=0,25$ , verifica-se que  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  apresenta menores valores. Analisando o comportamento das curvas respeitantes ao número de laminados, independentemente do seu número, observa-se que o seu comportamento é sempre decrescente, sendo mais acentuado para  $\mu$  entre 0,05 e 0,15.

A secção de  $\mu=0,05$  é aquela que apresenta maiores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço, o que leva a concluir que o reforço é mais eficiente para  $\mu$ 's baixos. Neste tipo de secções o modo de rotura que condiciona o dimensionamento é a rotura do FRP, sendo a resistência do FRP toda mobilizada, daqui se justifica os maiores valores de  $M'_{Rd}/M_{Rd}$ . A secção de  $\mu=0,25$  é aquela que apresenta menores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço, o que leva a concluir que o reforço é menos eficiente para  $\mu$ 's altos. Neste tipo de secções o modo de rotura que condiciona o dimensionamento é a rotura por esmagamento do betão, não sendo mobilizada toda a resistência do FRP devido à ocorrência do esmagamento do betão, daqui se justifica os baixos valores de  $M'_{Rd}/M_{Rd}$ .

Para secções a partir de  $\mu>0,15$  pode-se verificar que os acréscimos de  $M'_{Rd}$  com o aumento do número de camadas são baixos, devido ao modo de rotura que condiciona o dimensionamento (rotura por esmagamento do betão), o qual não permite a mobilização de toda a resistência do FRP por falta de capacidade resistente do betão.

O gráfico *b)* traduz os resultados obtidos pela aplicação do documento proposto pelo ACI. Pela análise do gráfico pode-se verificar que os maiores valores de  $M'_{Rd}/M_{Rd}$ , independentemente no número de laminados, são obtidos para a secção de menor  $\mu$ . Para valores de  $\mu=0,25$  verifica-se que  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  é igual a 1, ou seja, não existe nenhum acréscimo de resistência com o reforço. Analisando o comportamento das curvas respeitantes ao número de laminados, independentemente do seu número, observa-se que o seu comportamento é sempre decrescente, sendo mais acentuado para  $\mu$  entre 0,05 e 0,10.

A secção de  $\mu=0,05$  é aquela que apresenta maiores acréscimos de  $M'_{Rd}$  e a secção de  $\mu=0,25$  é aquela que apresenta menores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço, tal como na proposta da *fib*, podendo-se inferir as mesmas

conclusões. No entanto, para  $\mu=0,25$  pode-se concluir que o reforço é inviável dado que  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  é igual a 1 para todas as camadas de reforço.

Para secções a partir de  $\mu>0,15$  pode-se verificar que os acréscimos de  $M'_{Rd}$  com o aumento do número de camadas são baixos, nomeadamente, a partir das três camadas de reforço, devido à redução da geometria da secção e ao modo de rotura que condiciona o dimensionamento (rotura por esmagamento do betão), o qual não permite a mobilização de toda a resistência do FRP. Pode-se concluir que para  $\mu>0,15$  e para camadas de reforço superiores a três, o reforço é inviável devido aos acréscimos de  $M'_{Rd}$  serem mínimos.

O gráfico c) traduz os resultados obtidos pela aplicação do documento proposto pelo CNR. Pela análise do gráfico pode-se verificar que os maiores valores de  $M'_{Rd}/M_{Rd}$ , independentemente no número de laminados, são obtidos para a secção de menor  $\mu$ . Para valores de  $\mu=0,25$ , verifica-se que  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  apresenta menores valores. Analisando o comportamento das curvas respeitantes ao número de laminados, independentemente do seu número, observa-se que o seu comportamento é sempre decrescente, sendo mais acentuado para  $\mu$  entre 0,05 e 0,10. No entanto, dado que a rotura do FRP é o modo de rotura dominante, pode-se verificar que o comportamento das curvas é idêntico, sendo estas paralelas entre si.

Tal como na *fib*, a secção de  $\mu=0,05$  é aquela que apresenta maiores acréscimos de  $M'_{Rd}$  e a secção de  $\mu=0,25$  é aquela que apresenta menores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço. Ao contrário dos outros dois documentos, para  $\mu=0,25$  o modo de rotura que condiciona o dimensionamento é a rotura pelo FRP, à excepção de quando se aplicam cinco camadas de reforço. Desta forma, pode-se verificar pelo gráfico que os ganhos de  $M'_{Rd}$  são mais significativos quando comparados com os resultados dos outros documentos analisados.

Para secções a partir de  $\mu>0,15$  e para uma camada de reforço verifica-se que o reforço é ineficiente, pois  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  é igual a 1.



### 7.2.2. Momento flector resistente em função do momento reduzido da secção e do número de camadas de laminado

Os gráficos da Figura 7.3 representam o comportamento do rácio entre o momento flector resistente após o reforço,  $M'_{Rd}$ , e o momento flector resistente antes do reforço,  $M_{Rd}$ , para diferentes camadas de reforço, segundo cada secção de momento reduzido,  $\mu$ .

Pode-se verificar pelos gráficos da Figura 7.3 que, para os três documentos, o rácio  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  aumenta consoante se aumentam o número de camadas de reforço. Para secções de  $\mu \leq 0,10$ , a proposta da *fib* é aquela que apresenta maiores ganhos de resistência, aproximando-se das outras propostas para secções em que  $0,15 \leq \mu \leq 0,25$ . Quanto à proposta do ACI, os resultados obtidos são intermédios entre as outras duas soluções para  $\mu \leq 0,10$  e para secções em que  $0,15 \leq \mu \leq 0,20$ , os resultados são similares aos da *fib*. Para secções de  $\mu = 0,25$ , o reforço não apresenta ganhos de resistência, sendo por isso inviável. Verifica-se também que para mais de três camadas de reforço e  $\mu \geq 0,20$ , os acréscimos de  $M'_{Rd}$  são inferiores aos obtidos pelos outros documentos. Quanto às soluções obtidas pelo documento do CNR, o reforço utilizando apenas uma camada de laminado é praticamente inviável, já que para  $\mu \geq 0,05$  não se conseguem ganhos de resistência. De uma forma geral, pode-se verificar que as soluções obtidas pelo documento do CNR resultam num menor acréscimo de  $M'_{Rd}$ , mas para mais de três camadas de reforço e  $\mu \geq 0,20$ , os acréscimos de  $M'_{Rd}$  são superiores aos obtidos pelos outros documentos. Da análise pode-se concluir que para  $\mu \leq 0,20$ , as soluções obtidas pela *fib* e pelo ACI são as que resultam em maiores acréscimos de resistência, respectivamente, e para  $\mu > 0,20$ , as soluções obtidas pelo CNR são as que resultam em maiores acréscimos de resistência.

Para secções em que  $\mu = 0,25$ , a proposta do ACI não deve ser aplicada, dado que não existirá um aumento de resistência. Como já referido e analisando o *gráfico a)* da Figura 7.3,  $\mu = 0,05$  é a secção onde o reforço se traduz num maior aumento de  $M'_{Rd}$ , estando esta situação relacionada com o modo de rotura dominante neste tipo de secções – rotura do FRP –, modo que permite a máxima mobilização da resistência do FRP.

Pode-se ainda verificar pelo abaixamento das curvas que à medida que o momento reduzido aumenta, os ganhos de resistência com o reforço são cada vez menores. Para  $\mu = 0,25$  os ganhos de resistência são muito pouco expressivos ou até mesmo nulos, estando esta situação relacionada com o modo de rotura dominante neste tipo de secções – rotura

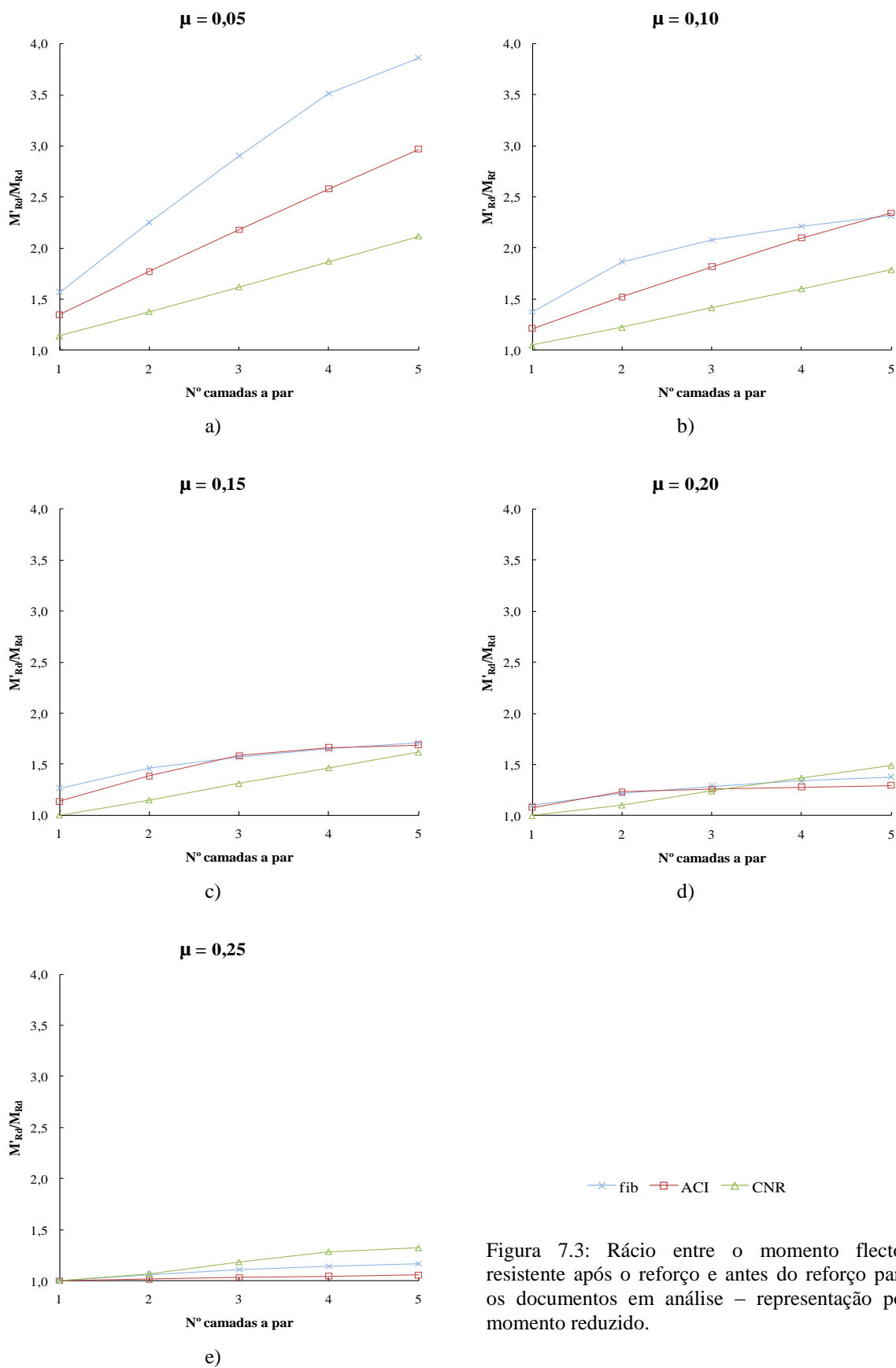


Figura 7.3: Rácio entre o momento flector resistente após o reforço e antes do reforço para os documentos em análise – representação por momento reduzido.

por esmagamento do betão –, modo que não permite a grande mobilização da resistência do FRP devido aos grandes níveis de tensão no betão, os quais levam à sua rotura.

Analisando o comportamento geral dos três documentos pode-se verificar que para  $\mu=0,05$  os maiores ganhos de resistência são obtidos pela proposta da *fib*, conseguindo-se um aumento de 3,9 vezes o momento flector resistente da viga sem reforço. A proposta do CNR é aquela da qual resultam os menores ganhos de resistência, conseguindo-se apenas ganhos máximos de 2,1 vezes o momento flector resistente da viga sem reforço. Em relação à secção de  $\mu=0,25$  os maiores ganhos de resistência são obtidos pela proposta do CNR e da *fib*, conseguindo-se um aumento de 1,3 e 1,2 vezes o momento flector resistente da viga sem reforço, respectivamente. Em relação aos ganhos de resistência obtidos pela proposta do ACI, estes são nulos.

As baixas resistências obtidas segundo a proposta do CNR advêm da limitação da extensão de cálculo a um valor baixo, e que visa prevenir eventuais descolamentos do FRP e outros fenómenos que possam levar à rotura. Este é o documento mais conservador.

### **7.3. Reforço por colagem de laminados sobrepostos**

Neste ponto efectuou-se uma análise onde se mostra a evolução do momento flector resistente para cada documento em análise, para diferentes momentos reduzidos e para diferentes camadas de reforço sobrepostas.

Na Figura 7.4 apresenta-se uma serie de gráficos que traduzem o comportamento do momento flector resistente para duas situações: as linhas contínuas representam a evolução do momento flector resistente para aplicação de camadas sobrepostas; e as linhas a traço interrompido representam a evolução do momento flector resistente para a aplicação de camadas a par.

Olhando para os gráficos pode-se verificar que para a proposta da *fib* os resultados obtidos pela aplicação das camadas de reforço sobrepostas ou a par são os mesmos devido à sobreposição perfeita das duas curvas. Sendo assim, os comentários feitos em 7.2 são válidos para esta situação. A proposta da *fib* é aquela que apresenta maiores ganhos de resistência quando comparada com os outros documentos para a situação da aplicação de camadas de laminado sobrepostas.

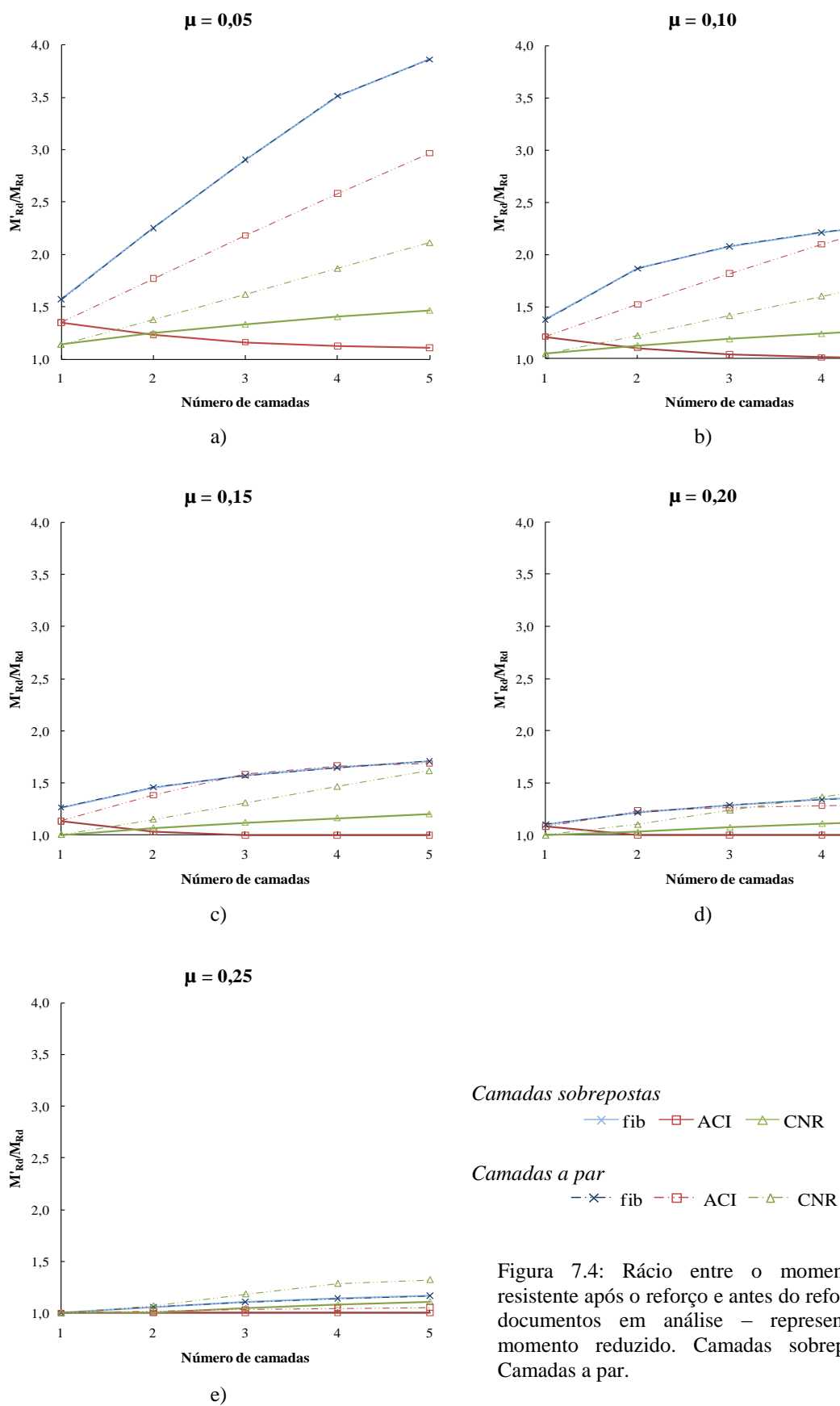


Figura 7.4: Rácio entre o momento flector resistente após o reforço e antes do reforço para os documentos em análise – representação por momento reduzido. Camadas sobrepostas v.s. Camadas a par.

Atentando nos resultados da proposta do ACI, verifica-se que para a aplicação de camadas de reforço sobrepostas os valores de  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  diminuem à medida que se aumentam o número de camadas de laminado sobrepostas, tendendo para 1 a partir de valores de  $\mu > 0,10$  e camadas de laminado em número superior a dois. Sendo estes resultados contraditórios, pois no limite o momento flector resistente manter-se-ia constante com o aumento do número de camadas, a justificação está no facto de com o aumento do número de camadas de reforço a extensão no aço diminuir e consequentemente a ductilidade do elemento também diminuir. Então, como o ACI propõe a afectação do momento flector resistente de um coeficiente de ductilidade,  $\phi$ , que varia entre 0,7 e 0,9 consoante a extensão no aço aumenta, quanto maior é o número de camadas de reforço, menor é a extensão no aço, menor é o coeficiente de ductilidade e menor é o momento flector resistente. Para além desta justificação, a metodologia de cálculo proposta pelo ACI foi elaborada tendo em conta que as camadas de reforço seriam aplicadas a par e não sobrepostas.

Quanto aos resultados da proposta do CNR pode-se verificar que o comportamento das curvas para os dois tipos de reforço é o mesmo. A diferença reside no facto dos acréscimos de  $M'_{Rd}$  serem inferiores para o caso em que se fazem os cálculos adoptando laminados sobrepostos. Assim sendo, todos os comentários tecidos em 7.2 são aqui aplicáveis.

De uma forma geral, os resultados obtidos pelo documento da *fib* são bastante diferentes dos obtidos pelos restantes documentos. No entanto, apenas se poderão comparar os resultados da *fib* e do CNR, sendo que os primeiros são bastante superiores aos segundos, principalmente para secções entre  $0,05 \leq \mu \leq 0,20$ .

Conclui-se então que segundo a proposta da *fib* os resultados não diferem caso os laminados sejam considerados a par ou sobrepostos, não acontecendo o mesmo para a proposta do CNR em que os resultados são algo inferiores. A proposta do ACI não é aplicável quando se considera um reforço com laminados sobrepostos, pois o momento flector resistente diminui ao invés de aumentar ou se manter constante.

## Capítulo 8.

### Considerações finais

#### 8.1. Conclusões

Nos dias de hoje os engenheiros estão, cada vez mais, à procura de novos materiais que permitam prolongar a vida das estruturas existentes, sendo os polímeros reforçados com fibras (FRP's – *Fiber Reinforced Polymer*) uma nova classe de materiais leves, de alta resistência, não corrosíveis e com inúmeras vantagens em relação aos materiais convencionais.

Nesta dissertação analisaram-se, nos capítulos 2 a 5, os documentos propostos pela *fib*, pelo ACI, pelo CNR e pelo ISIS. Nos capítulos 6 e 7 foram analisados os mesmos documentos à excepção do proposto pelo ISIS. Desta análise resultaram o leque de conclusões que se abaixo se apresentam.

A selecção dos materiais para o reforço é um processo complexo pois todos os sistemas são únicos e por isso apenas os sistemas testados e aplicados em larga escala no reforço de estruturas de betão devem ser utilizados.

Num sistema compósito matriz+fibras, o principal constituinte são as fibras. As matrizes do tipo *termoendurecível* são as mais utilizadas nos materiais compósitos e têm grande influência nas propriedades mecânicas do compósito.

Dos documentos analisados, o proposto pelo CNR é o mais completo no que respeita à abordagem sobre os vários tipos de materiais de reforço FRP.

Existem diferentes sistemas de reforço com FRP por colagem exterior (FRP-EBR) podendo ser divididos em sistemas curados *in-situ* (*wet-lay-up* e *prepreg*) e sistemas pré-fabricados ou pré-curados (*pre-cured*). Uma grande lacuna que existe hoje em dia em todas as normas e guidelines é o facto de estas não regularem ou definirem intervalos de valores para as características dos constituintes dos sistemas, nem definirem as características a

apresentar bem como as suas unidades. Cada fabricante tem o seu produto com as suas características em termos de resistência, módulo de elasticidade, alongamento na rotura, temperatura de aplicação, tempo de vida, etc. Devido a este facto cada resina, cada primário e cada tipo de fibra, têm propriedades singulares e por isso, sistemas idênticos têm características, por vezes, muito diferentes.

As técnicas de reforço com sistemas FRP podem ser divididas em dois grupos: os sistemas FRP-EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), onde o sistema é colado exteriormente, e os sistemas FRP-NSM (*Near-Surface Mounted Reinforcement*), onde o sistema é inserido em ranhuras feitas no elemento a reforçar.

O reforço das lajes à flexão pode ser feito com laminados, mantas ou tecidos. Os laminados podem ser aplicados paralelamente ou ortogonalmente e as mantas podem ser aplicadas em várias camadas de forma a conseguir a resistência necessária.

O reforço de vigas à flexão é conseguido através da colagem de laminados, mantas ou tecidos na face inferior da viga ou inserindo laminados em ranhuras também na face inferior da viga. Quando se necessita de maiores capacidades resistentes ou quando há necessidades de resistir a danos provocados por altas temperaturas, fogo, raios UV ou colisões, usa-se a técnica de reforço FRP-NSM, já que a capacidade de ancoragem do sistema é muito maior.

O reforço ao corte deve ser feito com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte, aplicadas de forma contínua ou em intervalos. O reforço pode ser aplicado apenas nas duas faces laterais da viga; em forma de “U” cobrindo as duas faces laterais e a base da viga; ou então pode ser aplicado de forma a envolver todas as faces da viga. O comportamento do reforço aplicado nas três faces é considerado idêntico ao aplicado nas quatro faces.

O reforço de pilares à flexão pode ser feito pela colagem de laminados, de barras e cascas pré-fabricadas ou pela aplicação de mantas ou tecidos colados externamente no pilar, sempre com a direcção das fibras orientada paralelamente ao seu eixo.

O reforço de pilares ao corte pode ser feito com a aplicação de mantas ou tecidos de forma a confinar o pilar, ou ainda com laminados pré-fabricados, aplicados com a direcção das fibras perpendiculares ao eixo do pilar.

Os documentos analisados neste trabalho abordam o reforço à flexão, ao corte, à torção e por confinamento de uma forma genérica e não direccionada a cada elemento estrutural em concreto.

O desempenho e a durabilidade dos sistemas de reforço FRP dependem muito da qualidade dos materiais usados e do cuidado tido por quem os aplica. É muito importante o desenvolvimento e a colocação em prática de processos de controlo e garantia de qualidade durante o processo de instalação.

Dos documentos analisados, o que melhor aborda a questão do controlo de qualidade é a norma elaborada pela *fib*.

As metodologias de cálculo do reforço contempladas por cada norma em análise foram aplicadas a um modelo teórico de viga com necessidades de reforço à flexão e ao corte.

A necessidade de reforço à flexão da viga teórica surgiu devido à transformação do edifício onde esta se insere, a qual implicou um aumento da sobrecarga de utilização na ordem das quatro vezes a sobrecarga inicial.

À semelhança do que se passa no dimensionamento de estruturas de betão armado, também nos FRP, em alguns casos, o cálculo é condicionado pelos estados SLS.

A lei de comportamento à tracção do FRP segue uma lei de tensão-extensão linear até à rotura.

Para proceder ao dimensionamento do reforço FRP é sempre necessário perceber o estado do elemento a reforçar e conhecer a carga no elemento antes do reforço, bem como as extensões e deformações existentes provocadas por esta mesma carga.

Os modos de rotura mais importantes a considerar no dimensionamento do reforço FRP são a rotura pelo FRP e a rotura por esmagamento do betão com cedência do aço de reforço à tracção.

Do dimensionamento em ULS obteve-se uma solução de reforço de 4 camadas de laminado a par segundo a *fib*, 5 camadas de laminado a par segundo o ACI e 4 camadas a par mais 4 camadas sobrepostas às primeiras segundo o CNR.

As soluções de reforço à flexão obtidas segundo o documento da *fib* e do ACI, resultam da situação condicionante em que ocorre *cedência da armadura seguida de esmagamento do*



betão. A solução obtida segundo o documento do CNR resulta da situação em que ocorre *rotura do FRP*, devido à baixa extensão de cálculo do FRP admitida por este documento quando comparada com a extensão admitida pelo outros dois documentos. Desta forma conclui-se que a limitação da extensão de cálculo imposta pelo CNR não é a mais correcta pois leva a resultados que poderão não corresponder à realidade.

Para os três documentos analisados, na verificação aos estados limites de serviço, o betão não cumpre a limitação de tensões imposta para ambas as combinações de acções.

No respeitante ao controlo de deformações em SLS, o ACI propõe a verificação da deformação a tempo imediato e a longo prazo ao contrário dos outros dois documentos que apenas propõem a verificação da deformação a longo prazo.

Quanto ao controlo da fendilhação, a proposta do ACI não propõe a verificação da abertura de fendas. Poderá esta ausência ser uma limitação deste documento e que eventualmente será viável a sua correcção.

Dos três documentos aplicados pode-se concluir que o proposto pelo CNR é o mais conservativo e o mais dispendioso, pois resulta numa solução com maior quantidade de laminado e menor momento resistente, sendo o ganho de resistência após reforço de 26,9 %. O documento menos conservativo é o da *fib*, já que se conseguem bons ganhos de resistência em termos de momento flector com a menor quantidade de laminado e o menor custo em comparação com as outras soluções obtidas. Aqui o ganho de resistência após reforço foi de 33,9 %. Por fim, a solução obtida pelo ACI é aquela que apresenta um maior ganho de resistência em termos de momento flector, 41,8%.

No reforço ao corte o dimensionamento é feito em relação aos ULS, não sendo proposta nenhuma verificação do reforço no que respeita a SLS.

Em relação à contribuição do reforço FRP pode-se verificar que a solução do CNR é mais conservativa já que o nível de tensão no FRP é o mais baixo quando comparado com as outras soluções. Por sua vez, a solução do ACI é a menos conservativa, pois é a que apresenta maior nível de tensão no FRP.

Em relação à capacidade resistente do conjunto, pode-se verificar que as soluções obtidas pelo ACI e pelo CNR resultam em resistências idênticas. Pode-se então considerar que o

seu grau de conservadorismo é idêntico. A solução obtida pela *fib* é a menos conservativa, resultando numa maior resistência do elemento reforçado.

A necessidade de reforço do pilar teórico surgiu devido ao edifício onde este se insere não ter sido calculado ao sismo, sendo então necessário proceder ao seu reforço por forma a que este resista à solicitação de um eventual sismo.

Em elementos confinados, por oposição ao aço e após cedência deste, o FRP exerce uma pressão de confinamento crescente com comportamento elástico até à rotura.

O confinamento de elementos de secção circular é mais eficaz que o confinamento de elementos de secção rectangular.

Os três documentos analisados são omissos relativamente ao reforço de pilares à flexão.

Dos três documentos aplicados, é da proposta do CNR que resulta a maior resistência à compressão do betão confinado, sendo portanto a proposta menos conservadora. A proposta do ACI é a que se revela mais conservadora pois o seu resultado é o menor dos três obtidos.

Das duas direcções de solicitação do sismo, pode-se concluir que a mais condicionante para o pilar é a direcção Y. É desta solicitação que resulta o reforço do pilar e que se traduz num reforço nas quatro faces para as propostas da *fib* e do ACI e reforços nas duas faces dos planos em X para a proposta do CNR.

O elemento teórico considerado na análise paramétrica foi uma viga simplesmente apoiada. Estudaram-se cinco tipos de secções cujos momentos reduzidos variaram de  $\mu=0,05$  até  $\mu=0,25$ , impondo-se que a maior dimensão fosse o dobro da menor dimensão. A análise paramétrica foi efectuada tendo em conta a variação do número de camadas de laminado, para a situação em que estes eram aplicados a par e para a situação em que estes eram aplicados sobrepostos.

Segundo a proposta da *fib*, a secção de  $\mu=0,05$  é aquela que apresenta maiores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço a par, o que leva a concluir que o reforço é mais eficiente para  $\mu$ 's baixos. A secção de  $\mu=0,25$  é aquela que apresenta menores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço a par, o que leva a concluir que o reforço é menos eficiente para  $\mu$ 's altos.

Segundo a proposta do ACI, a secção de  $\mu=0,05$  é aquela que apresenta maiores acréscimos de  $M'_{Rd}$  e a secção de  $\mu=0,25$  é aquela que apresenta menores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço a par, tal como na proposta da *fib*, podendo-se inferir as mesmas conclusões. No entanto, para  $\mu=0,25$  pode-se concluir que o reforço é inviável dado que  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  é igual a 1 para todas as camadas de reforço.

Segundo a proposta do CNR e à semelhança do que se passa nos outros dois documentos, a secção de  $\mu=0,05$  é aquela que apresenta maiores acréscimos de  $M'_{Rd}$ , e a secção de  $\mu=0,25$  é aquela que apresenta menores acréscimos de  $M'_{Rd}$  consoante se vai aumentando o número de camadas de reforço a par. Ao contrário dos outros dois documentos, para  $\mu=0,25$  os ganhos de  $M'_{Rd}$  são mais significativos quando comparados com os resultados dos outros documentos analisados. Para secções a partir de  $\mu>0,15$  e para uma camada de reforço verifica-se que o reforço é ineficiente, pois  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  é igual a 1.

Do comportamento geral dos três documentos pode-se verificar que para  $\mu=0,05$  os maiores ganhos de resistência são obtidos pela proposta da *fib*, conseguindo-se um aumento de 3,9 vezes o momento flector resistente da viga sem reforço. A proposta do CNR é aquela da qual resultam os menores ganhos de resistência, conseguindo-se apenas ganhos máximos de 2,1 vezes o momento flector resistente da viga sem reforço. Em relação à secção de  $\mu=0,25$ , os maiores ganhos de resistência são obtidos pela proposta do CNR e da *fib*, conseguindo-se um aumento de 1,3 e 1,2 vezes o momento flector resistente da viga sem reforço, respectivamente. Em relação aos ganhos de resistência obtidos pela proposta do ACI, estes são nulos.

As baixas resistências obtidas segundo a proposta do CNR, advêm da limitação da extensão de cálculo a um valor baixo, e que visa prevenir eventuais descolamentos do FRP e outros fenómenos que possam levar à rotura. Este é o documento mais conservador.

Para a proposta da *fib*, os resultados obtidos pela aplicação das camadas de reforço sobrepostas ou a par são os mesmos, devido à sobreposição perfeita das duas curvas. A proposta da *fib* é aquela que apresenta maiores ganhos de resistência quando comparada com os outros documentos para a situação da aplicação de camadas de laminado sobrepostas.

Segundo a proposta do ACI, verifica-se que para a aplicação de camadas de reforço sobrepostas os valores de  $M'_{Rd}/M_{Rd}$  diminuem à medida que se aumentam o número de camadas de laminado sobrepostas, tendendo para 1 a partir de valores de  $\mu > 0,10$  e camadas de laminado em número superior a dois, devido à diminuição da extensão no aço e à consequente diminuição da ductilidade que levam a redução do coeficiente de ductilidade a aplicar ao momento flector resistente.

Dos resultados da proposta do CNR pode-se verificar que o comportamento das curvas para os dois tipos de reforço é o mesmo. A diferença reside no facto dos acréscimos de  $M'_{Rd}$  serem inferiores para o caso em que se fazem os cálculos adoptando laminados sobrepostos.

Conclui-se que segundo a proposta da *fib* os resultados não diferem caso os laminados sejam considerados a par ou sobrepostos, não acontecendo o mesmo para a proposta do CNR em que os resultados são algo inferiores. A proposta do ACI não é aplicável quando se considera um reforço com laminados sobrepostos pois o momento flector resistente diminui ao invés de aumentar ou se manter constante.

## **8.2. Desenvolvimentos futuros**

Ao longo deste trabalho analisaram-se três normas seleccionadas de uma panóplia existente. Desta análise resultaram algumas conclusões acerca do seu conteúdo e resultaram também propostas de reforço de elementos teóricos. Apesar de se ter desenvolvido algum trabalho envolta do material inovador FRP, existem algumas propostas para desenvolvimentos futuros que se passam a enunciar pois este tema é muito vasto e ainda com bastante deficiência no seu estudo e aperfeiçoamento. Assim, propõe-se que as soluções de reforço obtidas ao longo deste trabalho sejam aplicadas a modelos à escala real e sejam ensaiadas de forma a se poder comprovar todos os cálculos efectuados e de alguma forma perceber se estas normas se encontram bem estruturadas no que respeita ao dimensionamento.

No que respeita às restantes normas, guidelines e recomendações propõe-se que seja feito um estudo e seja avaliada a credibilidade e fiabilidade de cada uma no que respeita a metodologias de dimensionamento, estados limites de utilização, processos de aplicação do reforço e monitorização dos elementos reforçados.

Em relação à definição dos materiais constituintes dos sistemas FRP propõe-se que sejam criadas regras de apresentação dos diversos materiais, as quais permitam a uniformização da determinação e apresentação das propriedades dos sistemas FRP, com a finalidade de se normalizar a vasta gama de produtos e sistemas FRP.

Propõe-se também o estudo e desenvolvimento de metodologias de cálculo de reforço de lajes à flexão, reforço de pilares sujeitos a flexão composta plana e desviada, e reforço de vigas contínuas com apoios intermédios.

Como os FRP's são um tema em desenvolvimento e que carece de um regulamento que seja aplicável para que o dimensionamento do reforço de estruturas possa ser uma tarefa mais segura propõe-se, após as análises anteriores, a reunião num só documento de todos os passos a seguir e a cumprir no dimensionamento do reforço de um elemento de betão armado. Poderá esse documento ser o passo que se necessita para a criação de um Eurocódigo que regule a aplicação dos FRP, tal como acontece com o betão armado, o aço, etc.

## Referências Bibliográficas

### A

- ACI 440K (2001), *Recommended Test Methods for FRP Rods and Sheets*, ACI Subcommittee 440-K, 83 p.
- ACI 440R-96 (2002), *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, ACI Committee 440, 68 p.
- ACI 440.2R-02 (2002), *Guide for the Design and Construction of Externally bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI Committee 440, 45 p.
- ACI 318-05 (2004), *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, Structural Building Code, ACI Committee 318, 430 p.
- ACI 440.3R-04 (2004), *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*, ACI Committee 440, 39 p.
- Araújo, C. M. (2002), *Reforço de Vigas de Concreto à Flexão e ao Cisalhamento com Tecidos de Fibra de Carbono*, PhD Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 153 p.
- Azevedo, D. M. M. (2008), *Reforço de Estruturas de Betão com Colagem de Sistemas Compósitos de CFRP. Recomendações para Dimensionamento*, MSc Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 238 p.

### B

- Barros, J. (2004), *Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas*, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Portugal.
- BASF (2007), *Reforçando Estruturas com a Utilização do Sistema Compósito Estrutural de Fibras de Carbono MBrace*, BASF Construction Chemical.

## C

CEN (2004), *Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*, Comissão Técnica CEN/TC250, 225 p.

Changzhou Lianke FRP Co. Ltd (2008), *Pultruded FRP Profiles*, <http://www.made-in-china.com/showroom/liankefrp/product-detail/LQrUPYsuVH/China-Pultruded-Frp-Profiles.html> (última visita em 6 Novembro 2008).

CNR (2004), *CNR-DT200/2004 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*, National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, 144 p.

Cruz, J. M. S. e Barros, J. A. O. (2002), *Caracterização Experimental da Ligação de Laminados de CFRP Inseridos no Betão de Recobrimento*, Relatório 02-DEC/E-15, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, 54 p.

## F

fib (2001), *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, Technical Report on the Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures, Task Group 9.3 FRP Reinforcement for Concrete Structures, International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland.

Fonseca, S. B. C. (2005), *Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras usadas na Engenharia Civil – Características e Aplicações*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 142 p.

Fonseca, S. B. C. (2007), *Utilização de Materiais Compósitos na Reabilitação de Estruturas de Betão*, Apresentação em PowerPoint do Seminário: Materiais em Ambiente Marítimo, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Funchal.

## I

IPQ (1998), *Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*, Comissão Técnica CT115 (LNEC), 157 p.

- ISIS (2001), *Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fiber Reinforced Polymers*, Design Manual n.º4, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Winnipeg, Manitoba, Canada, 209 p.
- ISIS (2006a), *Module 2 – An Introduction to FRP Composites for Construction*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 25 p.
- ISIS (2006b), *Module 3 – An Introduction to FRP-Reinforced Concrete*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 35 p.
- ISIS (2006c), *Module 4 – An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 41 p.
- ISIS (2006d), *Module 5 – An Introduction to Structural Health Monitoring*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 39 p.
- ISIS (2006e), *Module 6 – Application and Handling of FRP Reinforcements for Concrete*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 27 p.
- ISIS (2006f), *Module 7 – An Introduction to Life Cycle Engineering & Costing for Innovative Infrastructure*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 28 p.



ISIS (2006g), *Module 8 – Durability of FRP Composites for Construction*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 21 p.

## J

JSCE (2001), *Recommendations for the Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets*, JSCE – Japan Society of Civil Engineers, Japan, 41 p.

Juvandes, L. F. P. e Costa, A. G. (2002), *Reforço e Reabilitação de Estruturas*, Módulo 2, Formação Profissional – Ordem dos Engenheiros, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Laboratório de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 78 p.

## M

Mallick, P. K. (1993), *Fiber - Reinforced Composites – Materials, Manufacturing and Design*, University of Michigan, Department of Mechanical Engineering, Dearborn, Michigan, USA, Marcel Dekker, Inc., 2<sup>a</sup> e.d., 561 p.

Marques, N. F. A. A. (2008), *Procedimentos de Aplicação e Controlo de Qualidade para Reforço com Sistemas Compósitos de FRP*, PhD Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 146 p.

MBrace (1998), *MBrace Composite Strengthening System*, Engineering Design Guidelines, Master Builders, Inc., 2 e.d., [www.masterbuilders.com](http://www.masterbuilders.com).

Megalooikonomou, K. G. (2007), *Modelling of FRP-Confinement of Rectangular RC Sections*, PhD Thesis, Rose School, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Pavia, Italy, 83 p.

Miller, E. (1996), *Introduction to Plastics and Composites – Mechanical Properties and Engineering Applications*, California State University – Long Beach, California, USA, Marcel Dekker, Inc., 429 p.

Mirmiran, A. e Shahawy, M. (2008), *Recommended construction specifications and process control manual for repair and retrofit of concrete structures using bonded FRP composites*, National Cooperative Highway Research Program, American Association of State Highway and Transportation officials, Transportation Research Board, Washington DC, NCHRP report n°.609, 71 p.

Motavalli, M. (2008), *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures: Post Strengthening*, Apresentação em PowerPoint Fiber Composites FS08, Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland.

Motavalli, M. e Czaderski, C. (2007), *FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State-of-the-Art Review*, Empa – Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland, 10 p.

## P

Petersen, C. e Poulsen, E. (2001), *In-situ Quality Control of Structural Strengthening by Epoxy-Bonded CFRP Strips*, International Conference Composites in Construction, Porto, Portugal, pp. 427-432.

## R

Replark (1997), *Revitalizing Concrete Structures – Replark Technical Data sheet – Replark Systems Guideline*, Carbon Fiber Prepreg Sheet for Construction Industries – Replark System Procedure Instruction, Mitsubishi Chemical Corporation, 81 p.

RSA (2004), *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*, Decreto-Lei n.º 235/83 de 31 de Maio, Colecção Regulamentos, Porto Editora, 96 p.

RSP (2009), Response 2000 – Programa automático de análise de secções, retirado de <http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/home.shtml> em Maio de 2009.

## S

S&P (2006), *Design Guideline for S&P FRP Systems*, S&P Clever Reinforcement Company, Switzerland, 58 p.

- Sika (2003), *Sika Carbodur FRP Composites for Repair & Strengthening of Structures*, Design Manual, Sika Poland SP, e.d. March 2003, Poland, 78 p.
- Silva, P. A. S. C. M. (2008), *Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por Colagem Exterior de Sistemas de CFRP*, PhD Thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 556 p.
- Soares, C. M. e Martins, J. G. (2006), *Reforço de Estruturas de Betão Armado com CFRP*, Série Reabilitação, 1ª e.d., 240 p.
- Szabó, Z. K. e Balázs, G. L. (2007), *Near Surface Mounted FRP Reinforcement for Strengthening of Concrete Structures*, Periodica Polytechnic, Civil Engineering, pp. 33-38.

Neste anexo encontram-se os dados relativos a alguns pontos do corpo desta dissertação.

### A. Análise paramétrica

#### A.1. Dados relativos aos gráficos da Figura 7.2

##### Documento da fib

Momento flector resistente da viga sem reforço -  $M_{Rd}$  (kN.m) 185,0

$N^{\circ}$  camadas a par 1  
 $N^{\circ}$  camadas sobrepostas 1

$\mu$	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	290,4	1,6	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
0,10	254,1	1,4	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
0,15	233,9	1,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
0,20	203,5	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,25	185,0	1,0	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

$N^{\circ}$  camadas a par 2  
 $N^{\circ}$  camadas sobrepostas 1

$\mu$	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	416,6	2,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
0,10	344,8	1,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
0,15	269,7	1,5	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,20	224,8	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,25	196,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par **3**  
Nº camadas sobrepostas **1**

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	537,2	2,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
0,10	384,1	2,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,15	290,2	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,20	238,2	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,25	204,8	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par **4**  
Nº camadas sobrepostas **1**

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	650,2	3,5	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
0,10	408,8	2,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,15	305,0	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,20	247,7	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,25	211,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par **5**  
Nº camadas sobrepostas **1**

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	714,8	3,9	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,10	428,0	2,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,15	316,3	1,7	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,20	254,9	1,4	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
0,25	215,6	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

### Documento do ACI

Momento flector resistente da viga sem reforço -  $M_{Rd} (kN.m)$  185,0

Nº camadas a par **1**  
Nº camadas sobrepostas **1**

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	249,5	1,3	Rotura do FRP
0,10	224,1	1,2	Rotura do FRP
0,15	210,0	1,1	Rotura do FRP
0,20	200,0	1,1	Rotura do FRP
0,25	185,0	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço

*Nº camadas sobrepostas* **1**

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	327,4	1,8	Rotura do FRP
0,10	281,3	1,5	Rotura do FRP
0,15	255,9	1,4	Rotura do FRP
0,20	228,0	1,2	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,25	187,8	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço

<i>Nº camadas sobrepostas</i>	<b>1</b>
-------------------------------	----------

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	<i>Modo de rotura</i>
0,05	403,4	2,2	Rotura do FRP
0,10	335,9	1,8	Rotura do FRP
0,15	292,9	1,6	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,20	233,2	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,25	190,9	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço

*Nº camadas sobrepostas* **1**

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	<i>Modo de rotura</i>
0,05	477,3	2,6	Rotura do FRP
0,10	388,0	2,1	Rotura do FRP
0,15	307,8	1,7	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,20	236,8	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,25	193,3	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço

*Nº camadas sobrepostas* **1**

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	<i>Modo de rotura</i>
0,05	549,3	3,0	Rotura do FRP
0,10	433,5	2,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,15	312,1	1,7	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,20	239,6	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
0,25	195,1	1,1	Esmagamento do betão com cedência do aço

# Documento do CNR

Momento flector resistente da viga sem reforço -  $M_{Rd}$  (kN.m) 185,0

Nº camadas a par 1

Nº camadas sobrepostas 1

$\mu$	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	211,0	1,1	Rotura do FRP
0,10	193,7	1,0	Rotura do FRP
0,15	185,3	1,0	Rotura do FRP
0,20	185,0	1,0	Rotura do FRP
0,25	185,0	1,0	Rotura do FRP

Nº camadas a par 2

Nº camadas sobrepostas 1

$\mu$	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	254,9	1,4	Rotura do FRP
0,10	226,0	1,2	Rotura do FRP
0,15	212,6	1,1	Rotura do FRP
0,20	204,1	1,1	Rotura do FRP
0,25	197,7	1,1	Rotura do FRP

Nº camadas a par 3

Nº camadas sobrepostas 1

$\mu$	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	299,6	1,6	Rotura do FRP
0,10	261,3	1,4	Rotura do FRP
0,15	242,1	1,3	Rotura do FRP
0,20	229,5	1,2	Rotura do FRP
0,25	218,6	1,2	Rotura do FRP

Nº camadas a par 4

Nº camadas sobrepostas 1

$\mu$	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
0,05	345,7	1,9	Rotura do FRP
0,10	296,0	1,6	Rotura do FRP
0,15	270,8	1,5	Rotura do FRP
0,20	253,0	1,4	Rotura do FRP
0,25	237,4	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço de reforço à tracção

<i>Nº camadas a par</i>	<b>5</b>
<i>Nº camadas sobrepostas</i>	<b>1</b>

$\mu$	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	<i>Modo de rotura</i>
0,05	391,3	2,1	Rotura do FRP
0,10	330,2	1,8	Rotura do FRP
0,15	298,8	1,6	Rotura do FRP
0,20	275,4	1,5	Rotura do FRP
0,25	244,2	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço de reforço à tracção

### A.2. Dados relativos aos gráficos da Figura 7.3

Momento flector resistente da viga sem reforço -  $M_{Rd} (kN.m)$  185,0

#### miu 0,05

*fib*

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	<i>Modo de rotura</i>
1	290,4	1,6	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	416,6	2,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
3	537,2	2,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
4	650,2	3,5	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
5	714,8	3,9	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

**ACI**

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	<i>Modo de rotura</i>
1	249,5	1,3	Rotura do FRP
2	327,4	1,8	Rotura do FRP
3	403,4	2,2	Rotura do FRP
4	477,3	2,6	Rotura do FRP
5	549,3	3,0	Rotura do FRP



**CNR**

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	211,0	1,1	Rotura do FRP
2	254,9	1,4	Rotura do FRP
3	299,6	1,6	Rotura do FRP
4	345,7	1,9	Rotura do FRP
5	391,3	2,1	Rotura do FRP

miu 0,10

*fib*

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	254,1	1,4	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	344,8	1,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
3	384,1	2,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	408,8	2,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	428,0	2,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

**ACI**

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	224,1	1,2	Rotura do FRP
2	281,3	1,5	Rotura do FRP
3	335,9	1,8	Rotura do FRP
4	388,0	2,1	Rotura do FRP
5	433,5	2,3	Esmagamento do betão com cedência do aço

**CNR**

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	193,7	1,0	Rotura do FRP
2	226,0	1,2	Rotura do FRP
3	261,3	1,4	Rotura do FRP
4	296,0	1,6	Rotura do FRP
5	330,2	1,8	Rotura do FRP

miu 0,15*fib*

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	233,9	1,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	269,7	1,5	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	290,2	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	305,0	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	316,3	1,7	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

ACI

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	210,0	1,1	Rotura do FRP
2	255,9	1,4	Rotura do FRP
3	292,9	1,6	Esmagamento do betão com cedência do aço
4	307,8	1,7	Esmagamento do betão com cedência do aço
5	312,1	1,7	Esmagamento do betão com cedência do aço

CNR

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,3	1,0	Rotura do FRP
2	212,6	1,1	Rotura do FRP
3	242,1	1,3	Rotura do FRP
4	270,8	1,5	Rotura do FRP
5	298,8	1,6	Rotura do FRP

miu 0,20*fib*

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	203,5	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
2	224,8	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	238,2	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	247,7	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	254,9	1,4	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

## ACI

Nº camadas a par	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	200,0	1,1	Rotura do FRP
2	228,0	1,2	Esmagamento do betão com cedência do aço
3	233,2	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
4	236,8	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
5	239,6	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço

## CNR

Nº camadas a par	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Rotura do FRP
2	204,1	1,1	Rotura do FRP
3	229,5	1,2	Rotura do FRP
4	253,0	1,4	Rotura do FRP
5	275,4	1,5	Rotura do FRP

miu 0,25

## fib

Nº camadas a par	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
2	196,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	204,8	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	211,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	215,6	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

## ACI

Nº camadas a par	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
2	187,8	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
3	190,9	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
4	193,3	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
5	195,1	1,1	Esmagamento do betão com cedência do aço

## CNR

Nº camadas a par	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Rotura do FRP
2	197,7	1,1	Rotura do FRP
3	218,6	1,2	Rotura do FRP
4	237,4	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço de reforço à tracção
5	244,2	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço de reforço à tracção

## A.3. Dados relativos aos gráficos da Figura 7.4

miu 0,05*fib*

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	290,4	1,6	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	416,6	2,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
3	537,2	2,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
4	650,2	3,5	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
5	714,8	3,9	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	290,4	1,6	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	416,6	2,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
3	537,2	2,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
4	650,2	3,5	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
5	714,8	3,9	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

## ACI

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	249,5	1,3	Rotura do FRP
2	227,7	1,2	Rotura do FRP
3	214,9	1,2	Rotura do FRP
4	208,5	1,1	Rotura do FRP
5	204,7	1,1	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	249,5	1,3	Rotura do FRP
2	327,4	1,8	Rotura do FRP
3	403,4	2,2	Rotura do FRP
4	477,3	2,6	Rotura do FRP
5	549,3	3,0	Rotura do FRP

**CNR**

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	211,0	1,1	Rotura do FRP
2	231,2	1,2	Rotura do FRP
3	246,8	1,3	Rotura do FRP
4	259,8	1,4	Rotura do FRP
5	271,3	1,5	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	211,0	1,1	Rotura do FRP
2	254,9	1,4	Rotura do FRP
3	299,6	1,6	Rotura do FRP
4	345,7	1,9	Rotura do FRP
5	391,3	2,1	Rotura do FRP

**miu 0,10**

*fib*

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	254,1	1,4	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	344,8	1,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
3	384,1	2,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	408,8	2,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	428,0	2,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	254,1	1,4	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	344,8	1,9	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
3	384,1	2,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	408,8	2,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	428,0	2,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

## ACI

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	224,1	1,2	Rotura do FRP
2	204,2	1,1	Rotura do FRP
3	193,0	1,0	Rotura do FRP
4	187,4	1,0	Rotura do FRP
5	185,0	1,0	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	224,1	1,2	Rotura do FRP
2	281,3	1,5	Rotura do FRP
3	335,9	1,8	Rotura do FRP
4	388,0	2,1	Rotura do FRP
5	433,5	2,3	Esmagamento do betão com cedência do aço

## CNR

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	193,7	1,0	Rotura do FRP
2	208,6	1,1	Rotura do FRP
3	220,1	1,2	Rotura do FRP
4	229,8	1,2	Rotura do FRP
5	238,3	1,3	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	193,7	1,0	Rotura do FRP
2	226,0	1,2	Rotura do FRP
3	261,3	1,4	Rotura do FRP
4	296,0	1,6	Rotura do FRP
5	330,2	1,8	Rotura do FRP

miu 0,15
*fib*

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	233,9	1,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	269,7	1,5	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	290,2	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	305,0	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	316,3	1,7	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	233,9	1,3	Cedência do aço seguida da rotura do FRP
2	269,7	1,5	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	290,2	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	305,0	1,6	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	316,3	1,7	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

ACI

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	210,0	1,1	Rotura do FRP
2	190,7	1,0	Rotura do FRP
3	185,0	1,0	Rotura do FRP
4	185,0	1,0	Rotura do FRP
5	185,0	1,0	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	210,0	1,1	Rotura do FRP
2	255,9	1,4	Rotura do FRP
3	292,9	1,6	Esmagamento do betão com cedência do aço
4	307,8	1,7	Esmagamento do betão com cedência do aço
5	312,1	1,7	Esmagamento do betão com cedência do aço

CNR

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,3	1,0	Rotura do FRP
2	197,5	1,1	Rotura do FRP
3	207,0	1,1	Rotura do FRP
4	215,0	1,2	Rotura do FRP
5	222,0	1,2	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,3	1,0	Rotura do FRP
2	212,6	1,1	Rotura do FRP
3	242,1	1,3	Rotura do FRP
4	270,8	1,5	Rotura do FRP
5	298,8	1,6	Rotura do FRP

miu 0,20*fib*

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	203,5	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
2	224,8	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	238,2	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	247,7	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	254,9	1,4	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	203,5	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
2	224,8	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	238,2	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	247,7	1,3	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	254,9	1,4	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

## ACI

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	200,0	1,1	Rotura do FRP
2	185,0	1,0	Rotura do FRP
3	185,0	1,0	Rotura do FRP
4	185,0	1,0	Rotura do FRP
5	185,0	1,0	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	200,0	1,1	Rotura do FRP
2	228,0	1,2	Esmagamento do betão com cedência do aço
3	233,2	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
4	236,8	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço
5	239,6	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço



**CNR**

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Rotura do FRP
2	190,8	1,0	Rotura do FRP
3	198,9	1,1	Rotura do FRP
4	205,8	1,1	Rotura do FRP
5	211,8	1,1	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Rotura do FRP
2	204,1	1,1	Rotura do FRP
3	229,5	1,2	Rotura do FRP
4	253,0	1,4	Rotura do FRP
5	275,4	1,5	Rotura do FRP

**miu 0,25**
**fib**

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
2	196,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	204,8	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	211,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	215,6	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
2	196,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
3	204,8	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
4	211,0	1,1	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão
5	215,6	1,2	Cedência do aço seguida do esmagamento do betão

## ACI

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
2	185,0	1,0	Rotura do FRP
3	185,0	1,0	Rotura do FRP
4	185,0	1,0	Rotura do FRP
5	185,0	1,0	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
2	187,8	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
3	190,9	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
4	193,3	1,0	Esmagamento do betão com cedência do aço
5	195,1	1,1	Esmagamento do betão com cedência do aço

## CNR

Nº camadas sobrepostas	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Rotura do FRP
2	186,4	1,0	Rotura do FRP
3	193,5	1,0	Rotura do FRP
4	199,5	1,1	Rotura do FRP
5	204,7	1,1	Rotura do FRP

Nº camadas a par	$M_{Rd} (kN.m)$	$M'_{Rd}/M_{Rd}$	Modo de rotura
1	185,0	1,0	Rotura do FRP
2	197,7	1,1	Rotura do FRP
3	218,6	1,2	Rotura do FRP
4	237,4	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço de reforço à tracção
5	244,2	1,3	Esmagamento do betão com cedência do aço de reforço à tracção